



**Pedro José  
Ramos Lopes**

## **Aplicação de sensores FBG em moldes para injeção**





**Pedro José  
Ramos Lopes**

## **Aplicação de sensores FBG em moldes para injeção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Fernando Santos Neto, Bolseiro de Pós-Doutoramento do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, da Doutora Nélia Jordão Alberto, Investigadora de Pós-Doutoramento do Instituto de Telecomunicações e do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro e do Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Trabalho parcialmente realizado com o apoio financeiro do programa INTERREG IV – SUDOE, através do projeto CarbonInspired 2.0 - Rede de integração e transferência de produtos de alto valor agregado com base em nanopartículas para indústria do espaço SUDOE (SOE4/P1/E793)





## **Júri**

Presidente

**Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia**

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Arguente

**Professor Doutor Mário António Simões Correia**

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Orientador

**Professor Doutor Victor Fernando Santos Neto**

Investigador em Pós-Doutoramento do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## Agradecimentos

Agradeço acima de tudo aos meus pais pelo apoio que sempre me deram para nunca desistir dos estudos, pela educação que me deram em casa e pela liberdade de escolha que me ofereceram quando vim para a Universidade.

Aos meus irmãos, todos eles mais velhos, que sempre me ajudaram quando precisei, ora com dúvidas de disciplinas, ora com conselhos para a vida futura.

À minha família em geral, à qual sempre me senti unido, por todos estes anos em que me deram sempre do seu melhor para mim.

Aos meus colegas da escola secundária, que ainda hoje estão muito presentes na minha vida e sempre me dão apoio quando estamos juntos.

Aos meus colegas da UA, por tantas horas de estudo, de conversas, de exames e trabalhos, de jantares, de muita coisa mesmo.

À minha colega Cátia Santos por ter ajudado muitas vezes no trabalho da dissertação e por muitas horas em que me ajudou com o texto.

Aos meus amigos do coro de jovens que sempre me incentivaram a trabalhar muito para a dissertação.

Aos meus melhores amigos que estão no grupo Diamantes de Fogo, por me terem ajudado e acompanhado ao longo dos últimos 12 anos na fé em Deus.

À empresa Matias Moldes, da Marinha grande, agradeço por ter feito os furos na placa moldante onde foram colocadas as fibras óticas com os sensores de Bragg.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UA pelos recursos postos à disposição, desde o material polimérico usado nas experiências até à máquina de injeção plástica.

Ao Instituto de Telecomunicações pelos recursos materiais e humanos colocados ao meu dispor, para o correto manuseamento das fibras óticas usadas ao longo da dissertação.

Ao meu orientador Victor Neto, pelas horas incontáveis de reuniões e avisos sobre a tese.

À minha coorientadora Nélia Alberto, por todo o apoio técnico a manusear as redes de Bragg, por muitas horas ao meu lado a trabalhar.

Ao meu coorientador Joel Vasco, pelo feedback que recebi sobre o texto e pelo trabalho de mediação em Leiria com a empresa Matias Moldes.

Aos professores que me acompanharam no meu percurso académico, muitos deles com um empenho fora do normal, e um especial destaque para a minha querida professora Conceição Lobo, pelos primeiros 4 anos de escola que foram a base de toda a minha carreira escolar.





## palavras-chave

Moldação por injeção, termolásticos, FBG, Bragg, fibra ótica, sensores de temperatura, moldes de injeção plástica, transferência de calor, provetes em PP.

## Resumo

Com o interesse crescente em analisar detalhadamente o comportamento do material fundido no processo de moldação por injeção, procedeu-se à aplicação de sensores de Bragg em fibra ótica (FBG) para medir temperaturas no interior do molde. Ainda hoje é uma incógnita precisar o comportamento do material polimérico no momento da injeção, principalmente a distribuição de temperaturas no perfil da frente de enchimento.

Para cumprir o objetivo da dissertação foram gravadas 12 redes de Bragg em 4 fibras óticas distintas com o objetivo de criar uma malha 2D no interior da placa fixa do molde, a 3 mm do plano de partição. As redes foram gravadas de forma estratégica a coincidir com a superfície moldante que está em contacto com as peças que são injetadas.

Para que as redes de Bragg ficassem operacionais, foram necessárias algumas etapas. A rede de Bragg é inscrita no núcleo da fibra ótica através de um método de gravação por laser. Com o intuito de conhecer o comportamento térmico de cada sensor de Bragg às variações de temperatura, procedeu-se a um ensaio de caracterização térmica em ambiente controlado.

De seguida, foram instaladas no molde de injeção plástica as fibras óticas com os sensores e sequentemente elaborados alguns ensaios de injeção, cada um com aproximadamente 40 ciclos de moldação.

Os resultados das experiências foram muitos semelhantes, e indicam que os sensores detetaram valores máximos de temperatura próximos dos 57 °C. Em cada ciclo de moldação as variações registadas nos sensores eram praticamente constantes e aproximadamente 3 ou 2 °C, conforme o sensor em causa.

Antes dos ensaios no molde de injeção, foi realizada uma simulação numérica no *software Autodesk Moldflow Synergy 2012*. Esta serviu para prever os comportamentos térmicos do ciclo de moldação e também para determinar os valores de alguns dos parâmetros de operação na máquina de injeção.

Esta tecnologia baseada em redes de Bragg é única, pois permite a disposição de inúmeros sensores de temperatura ao longo de uma fibra ótica, ocupando assim um volume muito reduzido. Estas vantagens aliadas à excelente resolução na aquisição de dados e à rápida resposta a impulsos térmicos fazem dos sensores FBG uma alternativa a ser tida em conta para futuros trabalhos relacionados com aplicações térmicas.



**keywords**

Injection molding, thermoplastics, FBG, Bragg, optical fiber, temperature sensors, injection molding mold, heat transfer, PP tensile test specimen .

**Abstract**

With the growing interest in thoroughly analyzing the behavior of the melted material in the process of injection molding, Fiber Bragg Gratings (FBG) were applied to measure temperatures in the mold interior. Still today it's unknown to precise the polymeric material behavior in the fill time, especially the temperature distribution in the front flow profile.

To fulfill the purpose of the dissertation 12 Bragg gratings were recorded in 4 different optical fibers with the purpose of creating a two-dimensional mesh in the injection mold's interior, 3 mm apart from the parting line. The gratings were inscribed in a strategic way to be placed over the molding surface which is in contact with the test specimens that are being injected.

For the Bragg gratings become operational, several steps were required. The Bragg grating is written in the fiber's core throughout a method using laser. An experience of thermal characterization in a controlled environment was mandatory to obtain the thermal behavior of each Bragg sensor.

Then, the optical fibers with the gratings were inserted in the injection mold molding and sequent were made a few injection tests, each one with approximately 40 molding cycles.

The results from the experiments were very similar and indicate that the sensors detect maximum values of temperature circa 57 °C. In each molding cycle the temperature variations were practically constant and were about 2 or 3 °C, depending on the sensor in use.

Before the molding tests, a numeric simulation was made using software *Autodesk Moldflow Synergy 2012*. This was made to preview the thermal cycle behaviors and also to determinate the values of some particular input operational parameters for the injection molding machine.

This technology based on Bragg gratings is unique, because it allows the provision of numerous temperature sensors along a single optical fiber, thus occupying a very small volume. These advantages combined with the excellent resolution in the data acquisition and the quick response to thermal impulses make the FBG sensors an alternative to be taken in good advice for future investigations or tasks applied to the thermal field.



# Índice

Lista de figuras .....	xv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de símbolos.....	xviii
Acrónimos .....	xviii
Elementos e compostos químicos .....	xix
Símbolos e constantes.....	xix
<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Enquadramento do problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos do trabalho.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 Conteúdo da dissertação .....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 2 – Moldação por injeção .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Introdução e perspetiva histórica .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Processo de moldação.....</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Máquinas de injeção horizontais .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4 Materiais termoplásticos para moldação por injeção .....</b>	<b>7</b>
<b>2.5 Moldes de injeção plástica .....</b>	<b>8</b>
<b>2.6 Fenómenos de transferência de calor .....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo 3 – Sensores de Bragg.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Introdução e perspetiva histórica .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Redes de Bragg gravadas em fibra ótica .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3 Gravação de redes de Bragg.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4 Sensibilidade das redes de Bragg a perturbações externas .....</b>	<b>17</b>
<b>3.5 Aplicação das redes de Bragg como sensores .....</b>	<b>18</b>
3.5.1 Medição da temperatura no setor do petróleo .....	18
3.5.2 Medição da temperatura em baterias de lítio em tempo real com sensores de Bragg .....	19
3.5.3 Aplicação de sensores de Bragg no eixo da árvore de uma máquina CNC.....	19
<b>Capítulo 4 – Simulação numérica .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Geração da malha.....</b>	<b>21</b>

4.2	Definição do conjunto simulado .....	22
4.3	Resultados da simulação .....	24
4.4	Conclusão .....	29
<b>Capítulo 5</b>	<b>– Trabalho Experimental.....</b>	<b>31</b>
5.1	Análise pré-experimental.....	31
5.2	Produção dos sensores FBG .....	35
5.3	Implementação das redes no molde de injeção plástica.....	39
5.3.1	Estudo do comportamento térmico do molde.....	39
5.3.2	Ensaio de injeção plástica com as redes de Bragg inseridas no molde.....	40
<b>Capítulo 6</b>	<b>– Análise e discussão de resultados .....</b>	<b>49</b>
6.1	Resultados da experiência com a placa de aquecimento.....	49
6.2	Resultados de diferentes experiências .....	50
6.3	Resultados comparativos de uma experiência .....	53
6.4	Análise à transferência de calor .....	61
<b>Capítulo 7</b>	<b>– Conclusões e trabalho futuro.....</b>	<b>65</b>
7.1	Conclusões.....	65
7.2	Trabalho futuro.....	66
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>67</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>69</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema representativo das etapas fundamentais de um ciclo de moldação .....	4
Figura 2.2 - Representação das diferentes posições do fuso dentro do cilindro ao longo do ciclo de injeção...	5
Figura 2.3 - Representação de uma máquina de moldar por injeção .....	6
Figura 2.4 - Representação da estrutura de um molde de duas placas .....	9
Figura 2.5 - Esquema representativo da troca de calor numa placa plana .....	10
Figura 3.1 - Representação em perspectiva e em corte transversal de uma fibra ótica. ....	14
Figura 3.2 - Esquema do funcionamento de uma rede de Bragg .....	15
Figura 3.3 - Esquema ilustrativo da gravação de redes de Bragg pelo método da máscara de fase .....	16
Figura 3.4 - Esquema ilustrativo da montagem experimental usada na gravação das redes de Bragg. ....	17
Figura 3.5 - Representação dos sensores FBG aplicados em baterias de lítio .....	19
Figura 3.6 - Localização dos sensores FBG .....	20
Figura 4.1 - Representação da peça com a malha gerada. ....	22
Figura 4.2 - Representação parcial da vista da placa do molde onde as peças são produzidas.....	22
Figura 4.3 - Representação do sistema simulado numericamente no <i>software</i> .....	23
Figura 4.4 - Representação da simulação da temperatura da frente de enchimento na injeção. ....	25
Figura 4.5 - Representação do tempo necessário para atingir a temperatura de extração.....	26
Figura 4.6 - Representação do tempo de enchimento. ....	26
Figura 4.7 - Representação dos valores da pressão de acordo com a localização no sistema.....	27
Figura 4.8 - Gráfico da pressão no bico da injetora ao longo do tempo de ciclo.....	28
Figura 4.9 - Representação das temperaturas ao longo dos canais do SCT. ....	28
Figura 4.10 - Representação da temperatura na superfície moldante. ....	29
Figura 5.1 - Representação em corte da perspectiva isométrica do molde de injeção utilizado.....	32
Figura 5.2 - Vista frontal da placa da bucha com as posições das redes de Bragg sobrepostas e suas identificações .....	33
Figura 5.3 - Representação com as cotas entre os sensores .....	34

Figura 5.4 - Representação em corte (ampliada 5x) do encaixe da fibra na placa do molde. ....	34
Figura 5.5 - Sistema de gravação com laser de excimeros presente no IT. ....	35
Figura 5.6 - Montagem experimental usada na caracterização térmica das redes de Bragg .....	36
Figura 5.7 - Espectro de reflexão de 4 redes de Bragg a 22 e a 300 °C. ....	37
Figura 5.8 - Gráfico da regressão linear dos pontos obtidos na experiência de caracterização térmica para o sensor C2. ....	38
Figura 5.9 - Gráfico com variação da temperatura no sensor C2 (aquecimento entre 125 e 150 °C).....	40
Figura 5.10 - Fibras com os sensores de Bragg colocadas no molde montado na máquina de injeção. ....	41
Figura 5.11 - Gráfico da temperatura em função do tempo para o sensor C2. ....	42
Figura 5.12 - Gráfico com o pormenor da influência do SCT na temperatura registado no sensor C2. ....	44
Figura 5.13 – Gráfico representativo do início dos ciclos de injeção registado no sensor C2.....	45
Figura 5.14 - Gráfico com a temperatura no tempo de um ciclo de injeção para o sensor C1. ....	46
Figura 5.15 - Gráfico da evolução da temperatura média do molde ao longo do ciclo de moldação .....	46
Figura 5.16 - Exemplo de um par de peças produzido nos ensaios com a máquina de injeção.....	47
Figura 6.1 - Gráfico da variação da temperatura no sensor A1 (aquecimento entre 100 e 125 °C).....	49
Figura 6.2 - Gráfico da variação da temperatura no sensor A1 (aquecimento entre 25,5 e 50 °C).....	50
Figura 6.3 - Gráfico comparativo dos dados dos ensaios 1 e 2 no sensor C1.....	51
Figura 6.4 - Gráfico comparativo do tempo de um ciclo dos ensaios 1 e 2 no sensor C1. ....	52
Figura 6.5 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores B1 e C1.....	54
Figura 6.6 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores B2 e C2.....	54
Figura 6.7 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A2 e D2. ....	55
Figura 6.8 - Representação em perspetiva do pormenor do pino extrator com a cavidade da peça. ....	56
Figura 6.9 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A1 e D1. ....	57
Figura 6.10 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A3 e D3. ....	57
Figura 6.11 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A4 e D4. ....	58
Figura 6.12 – Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores da peça 1. ....	59
Figura 6.13 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores da peça 2.....	60
Figura 6.14 - Temperaturas em cada sensor nos instantes de tempo ao longo de um ciclo de moldação (valores em °C).....	61
Figura 6.15 - Esquema representativo do corte da placa da cavidade com o fluxo de calor do ponto 1 para o ponto 2 (distância em mm). ....	62
Figura 6.16 - Esquema do fluxo de calor (distâncias em mm). ....	62



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação dos termoplásticos em termos comerciais .....	7
Tabela 2.2 - Lista dos principais termoplásticos de grande consumo e suas propriedades.....	8
Tabela 4.1 - Propriedades da malha em casca gerada (para uma peça). ....	21
Tabela 4.2 - Principais propriedades do material selecionado para as simulações. ....	24
Tabela 4.3 - Propriedades da máquina de injeção usada no software de simulação. ....	24
Tabela 5.1 - Valores dos coeficientes de sensibilidade térmica de cada sensor (unidades em $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ). ....	38
Tabela 5.2 - Condições de injeção do Polipropileno (PP) .....	41
Tabela 5.3 - Propriedades físicas do Polipropileno (PP) .....	42
Tabela 6.1 - Valores máximos da temperatura em cada sensor nos ensaios 1 e 2 (valores em $^{\circ}\text{C}$ ). ....	52
Tabela 6.2 - Temperaturas dos sensores ao longo do tempo de um ciclo (valores em $^{\circ}\text{C}$ ).....	60

# Lista de Símbolos

## Acrónimos

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
ASA	Acrilonitrilo-estireno-acrílico
CNC	Controlo numérico computadorizado
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
EUA	Estados Unidos da América
FBG	Fiber Bragg Grating (Rede de Bragg em fibra ótica)
FV	Fibra de vidro
HDPE	Polietileno de alta densidade
HIPS	Poliestireno resistente ao impacto
IT	Instituto de Telecomunicações (Polo de Aveiro)
LCP	Polímero de cristal líquido
LDPE	Polietileno de baixa densidade
PA 12	Poliamida 12 (polidodecaprolactama)
PA 6	Poliamida 6 (policaprolactama)
PA 6.6	Poliamida 6.6 (polihexametilenoadipamida)
PBT	Poli(tereftalato de butileno)
PC	Policarbonato
PEEK	Polieteretercetona
PEI	Polieterimida
PES	Polietersulfona
PET	Poli(tereftalato de etileno)

PMMA	Poli(metacrilato de metilo) ou acrílico
POM	Poli(óxido de metileno) ou poliacetal
PP	Polipropileno
PPO	Poli(óxido de fenileno)
PPS	Poli(sulfureto de fenileno)
pPVC	Plasticized PVC (PVC flexível)
PS	Poliestireno
PSO	Polisulfona
PVC	Policloreto de vinilo
SAN	Copolímero de estireno-acrilonitrilo
SB	Copolímero de estireno-butadieno
SCT	Sistema de controlo da temperatura
TFBG	Tilted Fiber Bragg Grating (Rede de Bragg inclinada em fibra ótica)
UA	Universidade de Aveiro
uPVC	Unplasticized PVC (PVC rígido)
UV	Ultra Violet (Ultravioleta)

## Elementos e compostos químicos

Ar	Árgon
Ge	Germânio
KrF	Fluoreto de cório

## Símbolos e constantes

$A_t$	Área transversal ao fluxo de calor
<i>Coef. dil. linear</i>	Coefficiente de dilatação linear
$D_c$	Diâmetro do cilindro onde estão alojadas as fibras óticas
$g$	Constante de aceleração gravítica

$h_{int}$	Coeficiente de troca de calor por convecção
$k_{aço}$	Condutividade térmica do aço
$k_{ar}$	Condutividade térmica do ar
$L$	Espessura da placa de aço
$L_c$	Comprimento longitudinal do cilindro
$n_{ncl}$	Índice de refração do núcleo da fibra ótica
$n_{eff}$	Índice de refração efetivo do modo guiado de uma fibra
$Nu_D$	Número adimensional de Nusselt
$P_{inj}$	Pressão de injeção
$P_{man}$	Pressão de manutenção
$Pr$	Número adimensional de Prandtl
$q_x$	Fluxo de calor na direção $x$
$r$	Raio do cilindro onde estão alojadas as fibras óticas
$Ra_D$	Número adimensional de Rayleigh
$Resist. tração$	Resistência à tração
$R_{t,cond}$	Resistência ao fluxo de calor por condução
$R_{t,conv,i}$	Resistência ao fluxo de calor por convecção no interior do cilindro
$S_T$	Sensibilidade da rede de Bragg à temperatura
$T_{inj}$	Temperatura de injeção
$T_{int}$	Temperatura no interior do cilindro
$T_{max. serviço}$	Temperatura máxima de serviço
$T_{molde}$	Temperatura do molde
$T_f$	Temperatura de fusão
$T_{S1}$	Temperatura da superfície no ponto 1
$T_{S2}$	Temperatura da superfície no ponto 2
$\alpha$	Coeficiente de difusividade térmica do ar
$\alpha_n$	Coeficiente termo-ótico
$\alpha_A$	Coeficiente de expansão térmica
$\beta$	Coeficiente de expansão volumétrica térmica
$\Delta P$	Perturbação mecânica
$\Delta T$	Variação da temperatura

$\Delta\lambda_B$	Variação do comprimento de onda de Bragg
$\Lambda$	Período de modulação do índice de refração
$\lambda_B$	Comprimento de onda de Bragg
$\Lambda_{MF}$	Período das depressões da máscara de fase
$\nu_{ar}$	Coefficiente de viscosidade cinemática do ar



# Capítulo 1 – Introdução

---

## 1.1 Enquadramento do problema

Atualmente os materiais produzidos por injeção plástica são os mais utilizados para aplicações em componentes que vão desde um simples invólucro de uma memória *USB Flash Drive* até ao para-choques de um automóvel. A vantagem da utilização destes materiais prende-se com boas propriedades mecânicas associadas ao baixo peso relativamente aos materiais metálicos. A partir de um molde metálico, com as cavidades a tomar a forma pretendida do produto final, é possível produzir milhões de peças plásticas idênticas na forma, cor e aspeto. Assim, o custo elevado do fabrico do molde é amortizado através das quantidades de peças produzidas.

Setores vitais na economia mundial como a indústria automóvel, eletrónica, alimentar e médica têm vindo a aumentar os requisitos nos componentes termoplásticos. Um dos grandes propósitos relaciona-se com o tamanho das peças. A crescente necessidade de peças à escala micrométrica para aplicações nestas áreas de investigação levou a que a indústria de moldes se focasse nesta tecnologia com o objetivo de introduzir alterações de modo a torná-la mais eficiente e económica. Para que a tecnologia da produção de microcomponentes poliméricos através da moldação por injeção possa ser utilizada em grande escala é necessário ultrapassar alguns desafios tecnológicos. A razão de aspeto das cavidades a preencher, a geração de calor devido a elevadas tensões de corte, o atrito e o desgaste das superfícies moldantes são alguns dos fatores que influenciam a funcionalidade e a qualidade dos componentes.

## 1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento térmico das ferramentas moldantes com os ciclos de produção de peças poliméricas, de forma a melhor compreender os fenómenos de transferência de calor entre o polímero fundido, a ferramenta moldante e os sistemas de controlo da temperatura nela implantados. Para tal serão instaladas, na ferramenta moldante, fibras óticas com redes de Bragg (sensores FBG) gravadas com o intuito de registar as temperaturas em vários locais simultaneamente. Os sensores estarão dispostos de modo a formar uma matriz bidimensional paralela ao plano de partição do molde.

Com os dados recolhidos, far-se-á um estudo relativo a um ciclo de moldação, analisando os valores da temperatura ao longo do tempo para cada sensor.

Deste modo, além de comparar as temperaturas em diferentes locais do molde ao longo do tempo de ciclo, pretende-se concluir se a introdução da tecnologia dos sensores FBG em moldes de injeção plástica se apresenta como uma mais-valia para a análise térmica do ciclo de moldação.

## 1.3 Conteúdo da dissertação

Nos capítulos 2 e 3 será efetuada uma revisão do estado de arte da moldação por injeção e dos sensores de Bragg, respetivamente. Em relação à primeira parte, esta incide sobre os conceitos gerais acerca do processo de moldação, os vários componentes da máquina, os diversos termoplásticos existentes e uma breve exposição das principais características do molde de injeção. Na segunda parte é dada uma introdução e perspetiva histórica sobre a tecnologia das redes de Bragg em fibra ótica, explicados os métodos e sistemas de gravação utilizados, apresentadas as fórmulas que regem o comportamento das redes de Bragg a perturbações externas e são apresentados alguns exemplos da aplicação desta tecnologia noutros trabalhos de investigação.

No capítulo 4 é abordada a simulação numérica que foi realizada para prever o comportamento da injeção plástica a realizar *a posteriori*. É descrita a geração da malha, a definição do conjunto (peças, canais de alimentação e canais do sistema de controlo da temperatura) e, de seguida, apresentados os resultados da simulação.

No capítulo 5 é relatado o trabalho experimental, desde a análise *a priori*, passando pela produção dos sensores FBG, até à implementação dos sensores no molde de injeção plástica com os ensaios na máquina de injeção presente no DEM-UA.

No capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais e consequentemente analisados, procurando saber as causas que justificam os comportamentos térmicos observados. Ainda será exposta uma pequena análise ao fenómeno de transferência do calor por condução e convecção na placa do molde.

No capítulo 7 são discutidas conclusões do trabalho realizado e ainda apresentadas algumas propostas de trabalho futuro.



# Capítulo 2 – Moldação por injeção

---

## 2.1 Introdução e perspetiva histórica

O processo de moldação por injeção é um dos mais utilizados para a transformação de materiais de natureza polimérica. Tem muito impacto nos grandes mercados consumidores, em particular no setor automóvel, eletrónica e telecomunicações, embalagens e eletrodomésticos. Este método garante elevadas cadências de produção, precisão dimensional, boa reprodutibilidade, flexibilidade em termos de geometria e dimensões das moldações (com peças produzidas em micro moldações, inferiores a 1 mg, a peças com mais de 100 kg) [Cunha03a].

Esta tecnologia surgiu quando em 1872 foi patenteado o processo de moldação por injeção pelos irmãos Hyatt (EUA). Ao longo do século XX várias foram as evoluções que o processo sofreu que levaram até ao modo como hoje se conhece, cronologicamente, a máquina hidráulica, a máquina de parafuso alternativo e a máquina elétrica. Ao início, a moldação por injeção tinha sido desenvolvida para a transformação de resinas termoendurecíveis, mas depois evoluiu com o advento dos materiais termoplásticos, que se registou após a Segunda Guerra Mundial. Atualmente podem ser injetados elastómeros vulcanizados, e principalmente termoplásticos e termoendurecíveis [Cunha03a].

## 2.2 Processo de moldação

O ciclo de moldação de termoplásticos é composto por algumas etapas fundamentais: o fecho do molde, a plasticização, a injeção do material sob pressão pelo bico para a cavidade do molde, a pressurização e o arrefecimento e abertura do molde com o objetivo de extrair a peça. Simultaneamente este processo possui características específicas inerentes aos materiais plásticos, das quais se realçam a baixa difusidade térmica, o comportamento reológico e a elevada dependência térmica da densidade. As várias etapas estão representadas na Figura 2.1 e descritas detalhadamente no texto que lhe segue.

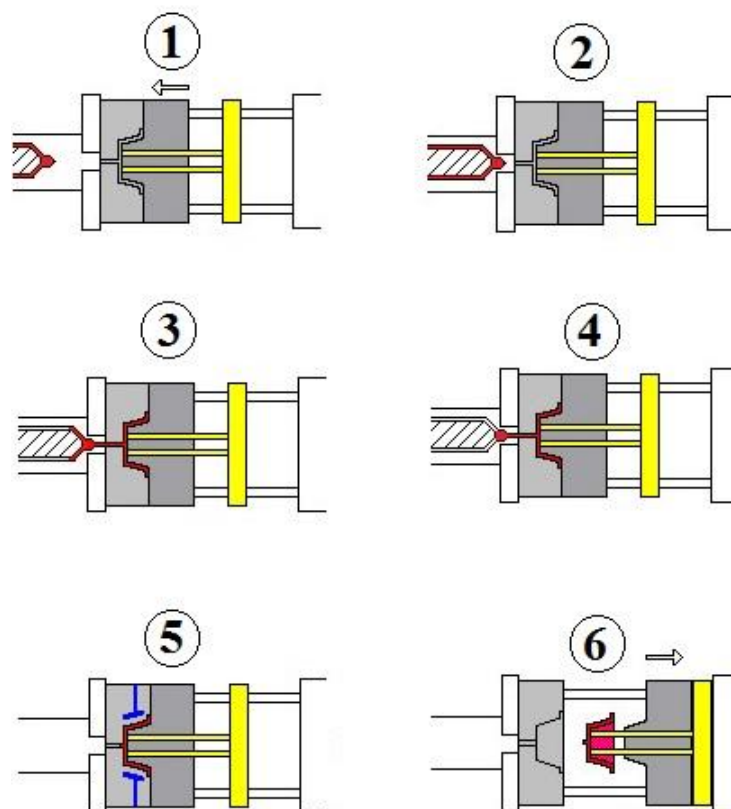


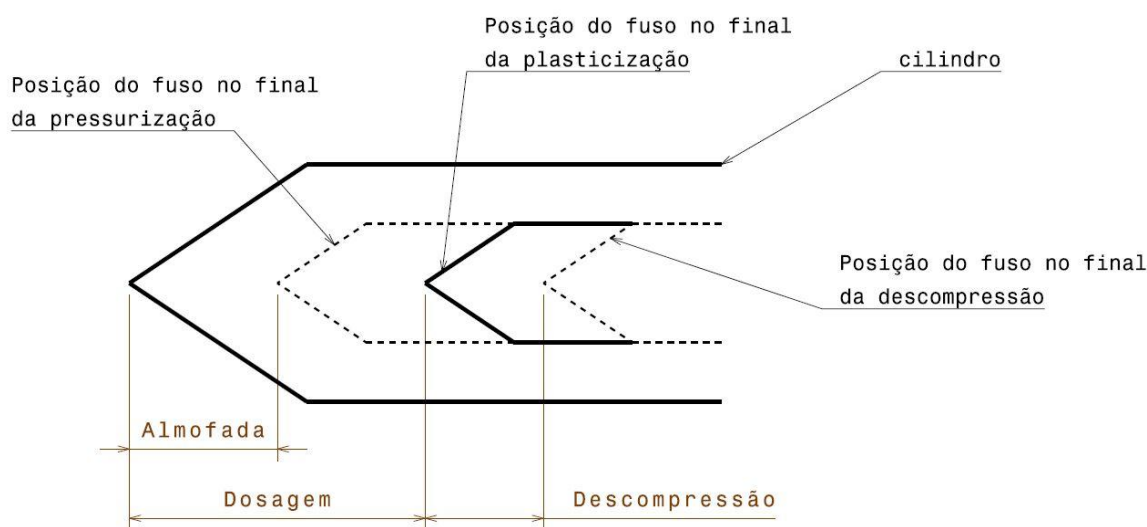
Figura 2.1 – Esquema representativo das etapas fundamentais de um ciclo de moldação. 1) Fecho do molde; 2) Plasticização; 3) Injeção; 4) Pressurização; 5) Arrefecimento; 6) Extração (adaptado de [Milmour13]).

1. **Fecho do molde:** Esta fase corresponde ao início do ciclo e a sua duração é curta. A única função que exerce é o deslocamento da placa móvel (depois de o sistema de extração estar completamente recuado) até à placa fixa. As limitações da velocidade no deslocamento nesta fase prendem-se com alguns fatores, tais como a inércia das massas das várias placas do molde, a obrigatoriedade de o encosto das duas partes do molde ser suave para não danificar as superfícies do plano de partição e possíveis movimentos internos no molde que ocorram simultaneamente [Cunha03a];
2. **Plasticização e homogeneização do material:** O plástico é adicionado com o formato granular na tremonha (funil de alimentação) e conseqüentemente aquecido até atingir uma temperatura elevada que permita que ele seja injetado sob pressão. Dentro do cilindro existe um fuso (sem-fim) que provoca o deslocamento do material e ao mesmo tempo fornece calor devido ao atrito criado pelo contacto [Cunha03a];
3. **Injeção:** O plástico fundido é injetado no molde passando por canais de alimentação e de distribuição até chegar às cavidades, onde toma a forma dos objetos a produzir. Esta fase tem uma duração de uns escassos segundos, dependendo do comprimento dos canais de alimentação e das dimensões das peças. O valor da velocidade de injeção do material fundido resulta de um compromisso entre a rapidez e a qualidade da peça, já que uma velocidade elevada pode provocar marcas na superfície do produto final [Cunha03a];
4. **Pressurização:** Nesta etapa é exercida uma pressão, designada por pressão de manutenção, e que corresponde a valores entre 30 e 60% da pressão de injeção. Esta fase tem como principal função reduzir o efeito da contração por arrefecimento. Enquanto na fase anterior o fator

preponderante era a velocidade de injeção, nesta fase passa a ser o controlo da pressão a característica mais determinante [Cunha03a];

5. **Arrefecimento:** Durante esta fase ocorre o arrefecimento das peças que é facilitado pela circulação forçada de um fluido refrigerante, normalmente água, pelas placas moldantes. A duração desta fase depende principalmente da espessura das peças e do projeto do molde, particularmente no dimensionamento do sistema de controlo da temperatura (diâmetros dos canais, temperatura do fluido refrigerante e distância dos canais à cavidade moldante). Geralmente, a redução do tempo de ciclo faz-se através de alterações nos parâmetros associados a esta etapa. Por este motivo, esta é uma das principais fases do ciclo [Cunha03a];
6. **Extração das peças:** As peças são extraídas do molde assim que elas tenham arrefecido o suficiente para adquirir a forma final. Esta fase compreende a abertura do molde e a atuação dos extratores para retirar as peças que normalmente ficam em contacto com a placa das buchas quando as placas se separam.

No processo de injeção de termoplásticos num molde é necessário ter em atenção alguns pormenores nas propriedades, quer da máquina, quer do material, para produzir peças que preencham os requisitos de qualidade exigidos pelo cliente/consumidor. Designam-se por variáveis operatórias aquelas sobre as quais o operador pode atuar diretamente com o objetivo de controlar o sistema da máquina de injeção ou dos dispositivos auxiliares. As variáveis mais importantes são: temperatura do molde, velocidade de injeção, pressão de injeção, pressão de manutenção, velocidade de rotação do fuso, dosagem, almofada, tempo de arrefecimento, velocidades de movimentação do sistema de fecho, força de fecho e tempo de ciclo [Cunha03a]. Algumas destas variáveis operatórias estão relacionadas com os fenómenos que ocorrem no cilindro de plasticização. Na Figura 2.2 estão representadas algumas posições do fuso e associadas as variáveis operatórias a determinadas distâncias dentro do cilindro.



**Figura 2.2 - Representação das diferentes posições do fuso dentro do cilindro ao longo do ciclo de injeção (adaptado de [Cunha03a]).**

Por outro lado existem características às quais o operador não tem capacidade interventiva, pois são definidas nas fases de projeto da peça ou do molde. Estas propriedades designam-se por variáveis do processo e contemplam a geometria da moldação, os sistemas de alimentação,

capacidade de injeção da máquina, geometria do bico de injeção e distribuição de temperaturas na superfície moldante. Em relação à matéria-prima usada na injeção, esta possui um conjunto de características associadas, entre as quais as mais importantes são: viscosidade, contração, sensibilidade térmica, caráter anisotrópico e higroscopicidade [Cunha03a].

## 2.3 Máquinas de injeção horizontais

Este tipo de máquinas é o mais utilizado no ramo da injeção plástica por ser o único que garante a queda das peças por ação da gravidade quando se dá a extração. É constituída por quatro unidades principais: unidade de potência, unidade de comando, unidade de injeção e unidade de fecho.

A unidade de potência baseia-se num sistema hidráulico, acionado por um motor elétrico, que controla todos os atuadores. Denominam-se por atuadores todos os motores hidráulicos e cilindros que proporcionam o movimento dos vários componentes da máquina.

A unidade de comando estabelece a interface entre o utilizador e a máquina em tempo real. Através da monitorização das diversas variáveis do processo, esta unidade permite controlar as operações do ciclo de injeção [Rosato95].

A unidade de injeção tem o intuito de plasticizar e homogeneizar os materiais a moldar, desenvolver a pressão suficiente para assegurar o enchimento do molde a velocidade controlada e pressurizar a moldação de modo a corrigir a contração do material. No cilindro, o material plástico é aquecido, passando depois por três zonas distintas no fuso. As zonas diferem no passo e na espessura da rosca, e por isso cada uma opera de maneira específica no material. A primeira zona, mais próxima da tremonha, é chamada a zona de transporte, a segunda é denominada zona de compressão e a terceira, mais perto do bico de injeção, é designada zona de medição.

A unidade de fecho tem como objetivo fixar e movimentar o molde, manter o molde fechado durante a injeção e pressurização, e promover a extração das peças no final dos ciclos. É composto pelos pratos e colunas, que estão em contacto direto com o molde, pelo ejeter central e pelos sistemas de lubrificação e de acionamento [Cunha03b].

As últimas duas unidades estão representadas na Figura 2.3.

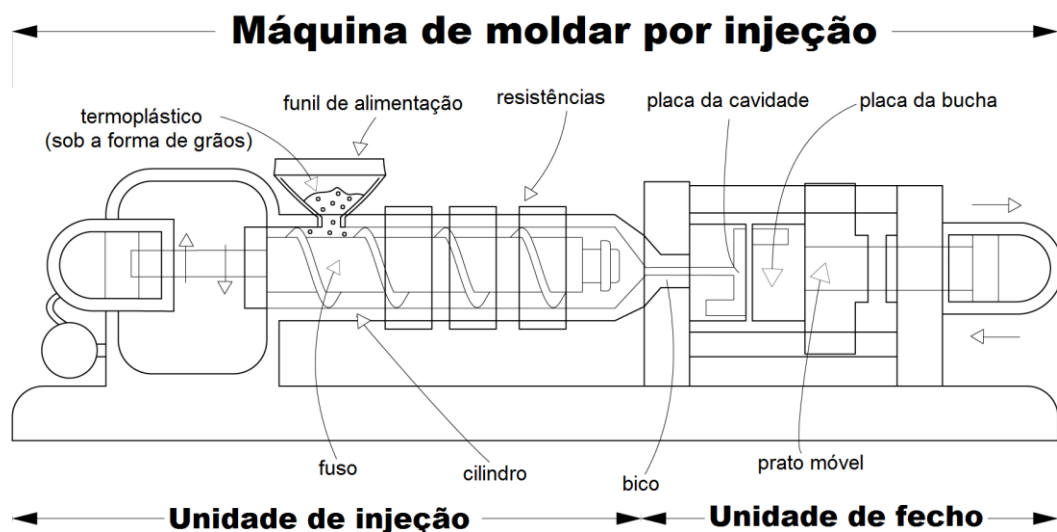


Figura 2.3 - Representação de uma máquina de moldar por injeção (adaptado de [Brockey13]).

## 2.4 Materiais termoplásticos para moldação por injeção

No período que sucedeu à Segunda Guerra Mundial, os materiais termoplásticos tiveram o seu período de maior desenvolvimento. Atualmente existem muitas vantagens que justificam a sua utilização em massa. Têm um processamento relativamente fácil e rápido, são facilmente recicláveis, possuem baixa densidade, rigidez média, transparência, brilho e elevadas resistências mecânica, química e ao impacto.

Os materiais termoplásticos dividem-se em cinco categorias: amorfos, semi cristalinos, de cristal líquido, elastómeros termoplásticos e misturas termoplásticas. Relativamente à importância comercial, os termoplásticos agrupam-se nas seguintes categorias: de grande consumo, de engenharia, de elevado desempenho e especiais. A Tabela 2.1 agrupa os termoplásticos mais comuns de acordo com duas das cinco categorias anteriormente mencionadas.

**Tabela 2.1 - Classificação dos termoplásticos em termos comerciais [Cunha03b].**

Classificação comercial	Amorfos	Semi cristalinos
Termoplásticos de elevado desempenho	PES, PEI, PSO	PEEK, PPS, LCP
Termoplásticos de engenharia	PC, PPO, PMMA, ABS, SAN, ASA	PBT, POM, PA 6, PA 6.6, PA 12
Termoplásticos de grande consumo	HIPS, SB, PS, PVC	PET, PP, HDPE, LDPE

A partir dos termoplásticos mencionados na Tabela 2.1, podem ser obtidos materiais compósitos, de matriz polimérica, reforçados com fibras (p. ex. de vidro ou de carbono). Este processo permite aumentar a resistência mecânica do material e a sua rigidez, entre outras vantagens.

Os termoplásticos de grande consumo representam aproximadamente 90% da produção mundial e correspondem a aplicações de grande envergadura, principalmente nas áreas da embalagem, construção civil, automóvel e utilidades. Relativamente aos outros tipos de termoplásticos, este é constituído por materiais substancialmente mais baratos por unidade de massa [Cunha03b]. As propriedades deste grupo de materiais podem ser consultadas na Tabela 2.2. Na mesma tabela,  $T_f$  simboliza a temperatura de fusão,  $T_{max\ serviço}$  representa a temperatura máxima de serviço, *Resist. tração* refere-se à resistência à tração e *Coef. dil. linear* traduz o coeficiente de dilatação linear.

Os termoplásticos de engenharia, também designados por plásticos técnicos, representam aproximadamente 10% do consumo e englobam materiais com bom desempenho mecânico, térmico, químico e excelente aspeto superficial. Regra geral, as temperaturas máximas de utilização nesta categoria de termoplásticos variam entre os 100 °C e os 150 °C [Cunha03b].

Os termoplásticos de elevado desempenho são compostos por polímeros comerciais que satisfazem especificações aplicacionais muito exigentes e simbolizam cerca de 0.1% do consumo mássico total de materiais plásticos. Podem suportar temperaturas de serviço superiores a 50 °C e possuem bom desempenho mecânico no que toca à rigidez, resistência e tenacidade [Cunha03b].

**Tabela 2.2 - Lista dos principais termoplásticos de grande consumo e suas propriedades [Cunha03b].**

Material (sigla)	Densidade	Tf °C	T max. serviço °C	Módulo GPa	Resist. tração MPa	Coef. dil. linear (1/°C)x10 <sup>5</sup>	Rigidez dielétrica MV/m
LDPE	0.915 - 0.025	117	60	0.3	10	20	27
HDPE	0.945 - 0.965	124	70	1.1	30	12	22
PP	0.901	174	100 - 110	1.3	35	8	22
PP + 30% FV	1.10		110 - 120	4.0	60	4	20
uPVC	1.40	—	70	3.0	50	6	14
pPVC	1.24 - 1.34		60	0.01 - 0.03	10 - 20	10 - 16	30
PS	1.01	100	80	3.0	30	8	20
HIPS	1.08			2.1	42	7	15
PET	1.30	265	150	3.0	60	10	20

## 2.5 Moldes de injeção plástica

Um molde é constituído por um sistema de placas e dispositivos que permite a produção em série de peças de qualidade num tempo de ciclo o mais curto possível. Durante o funcionamento deve garantir o volume com a forma das peças a produzir, promover a reprodutibilidade dimensional, assegurar o enchimento desse volume com o polímero fundido, ajudar o arrefecimento do polímero e permitir a extração das peças [Cunha03b].

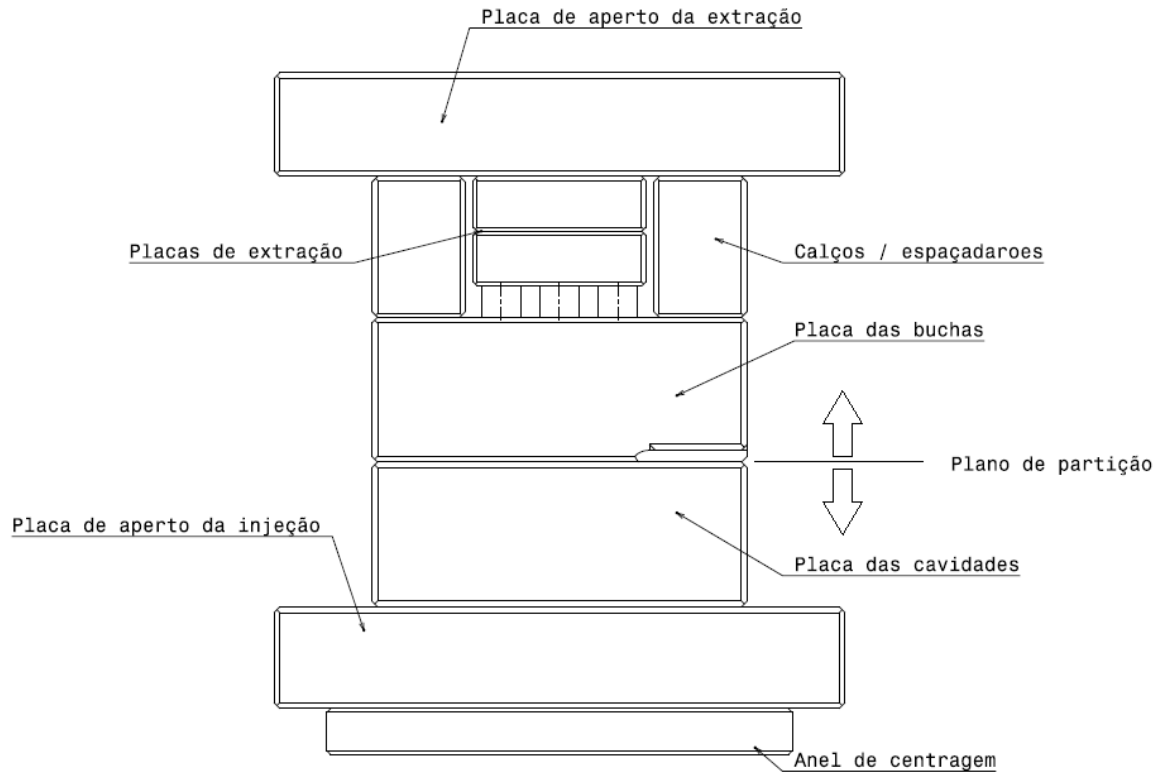
O conjunto do molde divide-se em seis sistemas funcionais:

1. impressão (zonas moldantes);
2. alimentação;
3. escape de gases;
4. controlo de temperatura;
5. centragem e guiamento;
6. extração.

A zona moldante é o espaço entre as placas da bucha e da cavidade que vai dar forma às peças a produzir. O sistema de alimentação possibilita a passagem do material polimérico fundido desde o bico de injeção até às zonas moldantes, para que estas fiquem preenchidas. O sistema de escape de gases é responsável pela extração do ar presente nas zonas moldantes, garantindo o enchimento por completo por parte do polímero fundido. O sistema de controlo de temperatura tem como principal objetivo acelerar o arrefecimento das peças dentro do molde, forçando a passagem de um fluido pelo interior das placas moldantes. O sistema de centragem e guiamento permite montar o molde na máquina e também garantir o correto ajuste (aperto e guiamento) entre as

diferentes partes do molde. O sistema de extração tem como única função retirar as peças do molde, sem provocar qualquer dano, no final de cada ciclo de injeção [Cunha03b].

Na Figura 2.4 é apresentada uma representação da estrutura típica de um molde de injeção plástica de duas placas (o tipo de moldes mais simples). No entanto, nesta representação não está contemplada a placa de reforço das buchas que normalmente é parte integrante do molde e se encontra montada entre a placa das buchas e os calços.



**Figura 2.4 - Representação da estrutura de um molde de duas placas.**

O molde pode ser dividido em duas grandes partes:

- Parte fixa, constituída por placa das cavidades, placa de aperto da injeção e anel de centragem;
- Parte móvel, composta por placa das buchas, calços, placas de extração e placa de aperto da extração.

Regra geral, a placa das cavidades (parte fêmea do molde) é maquinada para tomar a forma exterior das peças a produzir e a placa das buchas (parte macho do molde) é maquinada para tomar a forma interior das peças a produzir. Em ambas as placas pode-se substituir a zona maquinada por um postigo a ser montado nas placas. Em peças de alta qualidade com pormenores, a opção do postigo revela-se uma vantagem económica.

A dimensão do calço (vista verticalmente na Figura 2.4) define o curso máximo do sistema de extração, pois limita a distância que as placas de extração podem percorrer [Cunha03b].

## 2.6 Fenómenos de transferência de calor

Com o intuito de aprofundar o estudo relativamente às trocas de calor que ocorrem no molde, foram abordados alguns conceitos teóricos sobre a transferência de calor unidimensional em regime estacionário. Contudo, o caso real é muito mais complexo que este apresentado. A partir da analogia entre as difusões de calor e as de carga elétrica, surge a equação (2.1) que descreve a resistência térmica à condução numa placa plana [Incropera07]:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{S1} - T_{S2}}{q_x} = \frac{L}{k_{aço} A_t} \quad (2.1)$$

onde  $R_{t,cond}$  traduz a resistência ao fluxo de calor por condução,  $T_{S1}$  e  $T_{S2}$  simbolizam as temperaturas nos pontos 1 e 2 respetivamente,  $q_x$  representa o fluxo de calor na direção  $x$  no sentido do ponto 1 para o ponto 2,  $L$  equivale à espessura da placa,  $k_{aço}$  representa a condutividade térmica do aço, e  $A_t$  simboliza a área transversal ao fluxo de calor. Um esquema representativo da troca de calor por condução numa placa plana é apresentado na Figura 2.5.

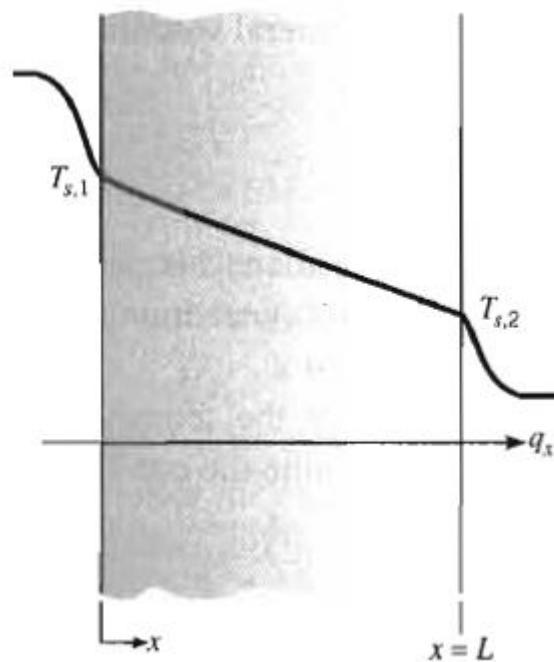


Figura 2.5 - Esquema representativo da troca de calor numa placa plana [Incropera07].

No caso seguinte, em que o calor é transferido do molde para o sensor de Bragg, ocorre o fenómeno de transferência de calor radial por convecção natural. Esta troca de calor ocorre num cilindro oco com 0,5 mm de diâmetro. A expressão que traduz a resistência térmica convecção radial é a seguinte [Incropera07]:

$$R_{t,conv,i} = \frac{1}{h_{int} 2\pi r L_c} \quad (2.2)$$



em que  $R_{t,conv,i}$  traduz a resistência ao fluxo de calor por convecção dentro do cilindro que contém as fibras óticas no molde,  $h_{int}$  representa o coeficiente de troca de calor por convecção,  $r$  simboliza o valor do raio do cilindro e  $L_c$  equivale ao comprimento longitudinal do cilindro.

Os dois valores das resistências calculadas são somados para gerar uma resistência equivalente, visto o fluxo de calor ser em série. Deste modo, surge a seguinte expressão:

$$q_x = \frac{T_{S1} - T_{int}}{R_{t,cond} + R_{t,conv,cil}} \quad (2.3)$$

em que  $T_{int}$  representa a temperatura interior no cilindro que corresponde à leitura do sensor de Bragg.

De todos os termos apresentados nas últimas equações, o que possui os métodos de cálculo mais complexos é o  $h_{int}$ . As seguintes equações apresentam os vários passos necessários ao seu cálculo [Incropera07]:

$$h_{int} = Nu_D k_{ar} \quad (2.4)$$

em que  $Nu_D$  representa o número adimensional de *Nusselt* que é a razão entre as transferências de calor por convecção e por condução, e  $k_{ar}$  simboliza a condutividade térmica do ar. O número de *Nusselt* pode ser calculado para um cilindro horizontal longo da seguinte forma [Incropera07]:

$$Nu_D = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\} \quad (2.5)$$

em que  $Ra_D$  representa o número adimensional de *Rayleigh* e  $Pr$  traduz o número adimensional de *Prandtl* que é a razão entre as difusividades de momento e térmica. O número de *Rayleigh* é calculado da seguinte forma [Incropera07]:

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_{S2} - T_{int})D_c^3}{\nu_{ar}\alpha} \quad (2.6)$$

onde  $g$  traduz a aceleração gravítica,  $\beta$  simboliza o coeficiente de expansão volumétrica térmica,  $D_c$  representa o diâmetro do cilindro que aloja as fibras,  $\nu_{ar}$  indica o coeficiente de viscosidade cinemática e  $\alpha$  exprime o coeficiente de difusividade térmica.

Esta adaptação do problema real da transferência do calor da peça para o molde é muito simples e pressupõe muitas condições prévias que são mencionadas na secção 6.4 deste documento.



## Capítulo 3 – Sensores de Bragg

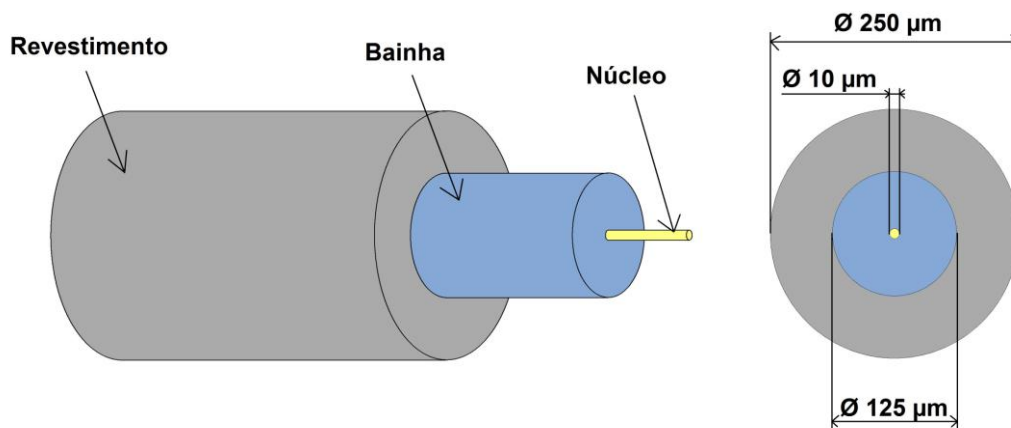
---

### 3.1 Introdução e perspectiva histórica

A rede de Bragg gravada no núcleo de uma fibra ótica permite a sua utilização como sensor a perturbações externas, tais como a deformação mecânica ou a temperatura. Algumas vantagens desta aplicação são a imunidade a interferências eletromagnéticas, o isolamento elétrico, a possibilidade de multiplexar numa única fibra um elevado número de sensores, a elevada sensibilidade conseguida com estes sistemas e a relação sinal-ruído [Othonos99]. No que diz respeito à aplicação prática das redes de Bragg no trabalho desta dissertação, estas suportam temperaturas máximas perto dos 500 °C. Esta característica é suficiente para garantir a funcionalidade do sensor, dado que as temperaturas máximas de injeção da generalidade dos termoplásticos se situam abaixo dos 300 °C.

Uma fibra ótica é constituída por uma camada designada núcleo, envolvida por uma outra, concêntrica, denominada bainha. Geralmente o diâmetro de uma fibra é 125  $\mu\text{m}$ , no entanto, de modo a possuir uma maior resistência mecânica, a fibra é revestida por uma camada adicional identificada como polímero, possuindo, neste caso, um diâmetro total de 250  $\mu\text{m}$ . Antes de se proceder à gravação da rede de Bragg é necessário remover o revestimento polimérico na zona de inscrição da FBG. O esquema representativo da composição da fibra ótica pode ser observado na Figura 3.1.

O princípio de funcionamento de uma fibra ótica baseia-se na diferença entre os índices de refração do núcleo e da bainha, sendo o do núcleo maior que o da bainha, para permitir a reflexão interna total que assegura a transmissão da luz no seu interior. Em relação à composição da fibra usada no âmbito desta dissertação, o núcleo é constituído por sílica dopada com boro e germânio, e a bainha, sílica pura.



**Figura 3.1 - Representação em perspectiva e em corte transversal de uma fibra ótica.**

A primeira rede de Bragg em fibra ótica foi gravada em 1978, no *Canadian Research Center*, por Hill e os seus colaboradores [Hill78, Kawasaki78]. Durante uma experiência foi lançada luz visível de um feixe de íons de argônio (Ar) para o núcleo da fibra com o objetivo de estudar os efeitos não lineares numa fibra ótica de sílica dopada com germânio (Ge). Após uma exposição continuada constatou-se um incremento na atenuação da fibra. Simultaneamente observou-se que a intensidade de luz refletida aumentava com o tempo de exposição. Nesta experiência, a luz laser que foi injetada no núcleo da fibra com um comprimento de onda de 488 nm interferiu com o feixe refletido no final da fibra e formou uma onda estacionária na fibra. Estudos realizados *a posteriori* concluíram que o aumento da refletividade resultava da modulação foto induzida do índice de refração do núcleo da fibra. A este novo efeito que possibilita a escrita permanente de uma rede na fibra ótica denominou-se fotossensibilidade.

Após a descoberta deste efeito da fotossensibilidade foi possível aumentar o número das configurações das redes de Bragg produzidas, que consistem em redes de Bragg uniformes (*Fiber Bragg Grating*, FBG), redes de Bragg inclinadas (*Tilted Fiber Bragg Grating*, TFBG), redes de Bragg aperiódicas, redes de Bragg apodizadas e redes de Bragg superestruturadas [Othonos97]. No trabalho desenvolvido para esta dissertação apenas foram utilizadas FBGs.

## 3.2 Redes de Bragg gravadas em fibra ótica

Uma rede de Bragg é uma estrutura formada por uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica ( $n_{ncl}$ ) ao longo do seu eixo longitudinal, geralmente criada pela exposição da fibra a um modelo ótico de interferência ultravioleta. Esta perturbação periódica do  $n_{ncl}$  atua como um filtro para os comprimentos de onda que satisfazem a condição de Bragg. Significa isto que o sinal emitido, a luz incidente, entra em ressonância ao passar na rede de Bragg resultando deste fenómeno um sinal refletido com o comprimento de onda específico dessa mesma rede de Bragg.

A condição de Bragg é dada por:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (3.1)$$

na qual  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg,  $\Lambda$  o período de modulação do índice de refração, e  $n_{eff}$  o índice de refração efetivo do modo guiado.

Na Figura 3.2 apresenta-se um esquema representativo do funcionamento de uma rede de Bragg. Os gráficos ilustrados representam os espectros de luz em função do comprimento de onda.

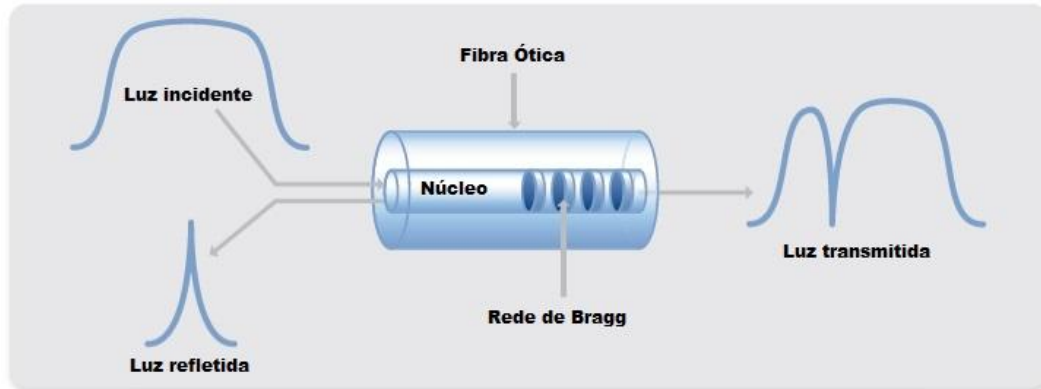


Figura 3.2 - Esquema do funcionamento de uma rede de Bragg (adaptado de [Ni13]).

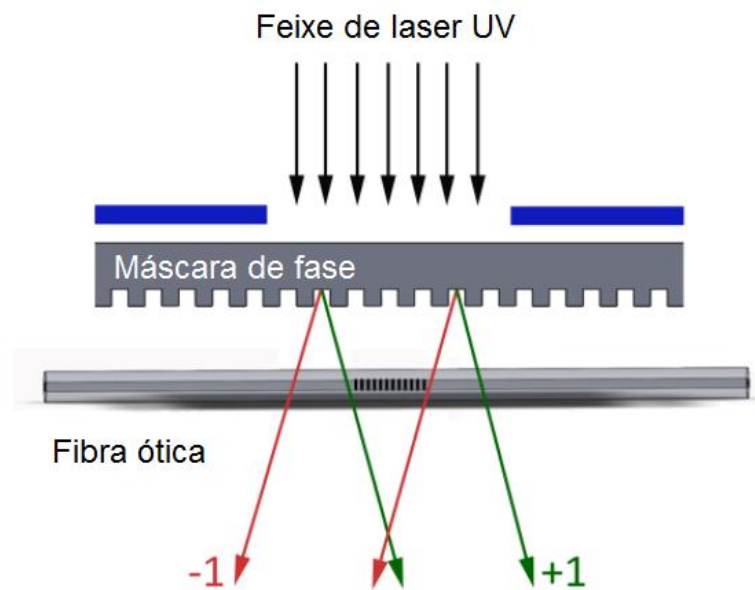
### 3.3 Gravação de redes de Bragg

Tal como foi referido anteriormente, uma rede de Bragg consiste numa modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra, normalmente produzida por um padrão de franjas de interferência na região do UV. Esse padrão pode ser obtido, por exemplo, com recurso a uma máscara de fase, por interferometria ou por gravação ponto a ponto. Dos vários métodos mencionados para gravar as redes de Bragg, apenas o da gravação por máscara de fase foi utilizado no trabalho desta dissertação.

O método da máscara de fase é o mais utilizado e um dos mais simples e eficazes na escrita de redes de Bragg. Pressupõe a utilização de uma máscara de fase, que consiste num elemento de difração ótico, formado por uma sequência de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica.

O modo de operar com esta técnica consiste na sobreposição de duas ordens de difração do núcleo da fibra com o intuito de se formar um padrão de interferência. A fibra ótica é posicionada perto da máscara de fase, para que a porção do núcleo da fibra onde se pretende gravar a rede de Bragg esteja incluída na zona de sobreposição das duas ordens difratadas. A sobreposição origina franjas de interferência e daí resulta uma rede de Bragg com um período de  $\Lambda = \Lambda_{MF}/2$ , onde  $\Lambda_{MF}$  simboliza o período das depressões da máscara de fase [Kashyap10]. Ou seja, pela condição de Bragg (Equação (3.1)) para redes com diferentes comprimentos de onda específicos são necessárias máscaras de fase com diferentes períodos das depressões.

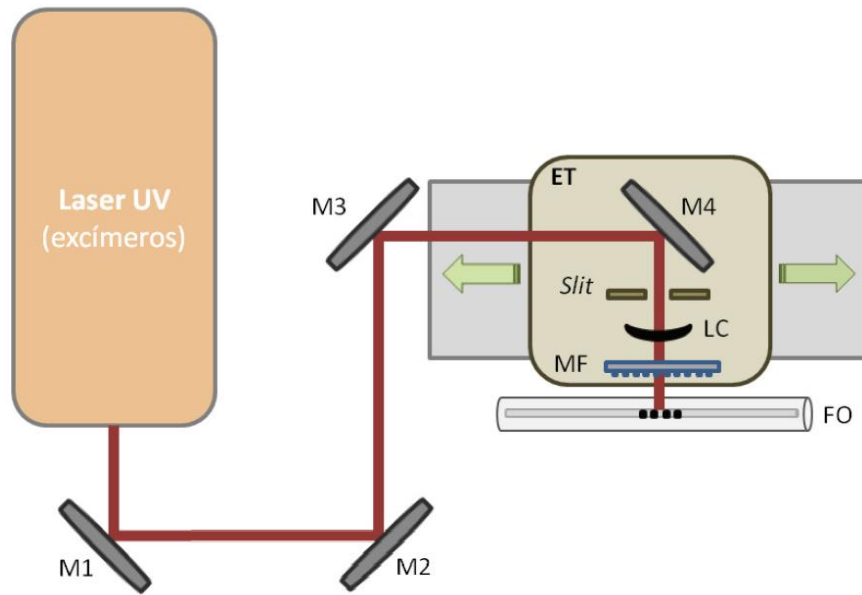
Na Figura 3.3 é apresentado um esquema ilustrativo da gravação de uma FBG pelo método da máscara de fase.



**Figura 3.3 - Esquema ilustrativo da gravação de redes de Bragg pelo método da máscara de fase [Alberto11].**

As redes de Bragg utilizadas no trabalho desta dissertação foram gravadas no sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações – Polo de Aveiro (IT). Este sistema permite a gravação de forma automática das redes de Bragg. Como fonte de luz possui um laser UV (ultravioleta) de excímeros (fluoreto de cripton, KrF), pulsado, *BraggStar Industrial* da *Coherent*, que emite a 248 nm. Para atenuar as perturbações mecânicas, a maior parte do sistema está montada numa mesa ótica, suspensa através de ar comprimido. Na Figura 3.4 é apresentado um esquema ilustrativo de montagem experimental usada.

De acordo com a figura pode-se constatar que o feixe emitido pelo laser é refletido pelo conjunto de espelhos (M1-M4), atravessando depois uma fenda ótica (*Slit*) onde a largura do feixe é controlada. Esta largura pode ser ajustada de 0 a 4 mm, com uma resolução de 1.5  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, o feixe passa por uma lente de focagem cilíndrica e de seguida pela máscara de fase. A lente tem como função focar o feixe e otimizar a sua energia. A fibra onde se pretende gravar a rede de Bragg está presa na zona de sobreposição por um conjunto de garras magnéticas [Marques08].



**Figura 3.4 - Esquema ilustrativo da montagem experimental usada na gravação das redes de Bragg.**  
**M1, M2, M3 e M4: espelhos; ET: estágio de translação; LC: lente cilíndrica; MF: máscara de fase;**  
**FO: fibra ótica [Alberto11].**

### 3.4 Sensibilidade das redes de Bragg a perturbações externas

A utilização das redes de Bragg como sensor de perturbações externas (temperatura, deformação mecânica, entre outras) provém da variação do comprimento de onda específico de cada rede resultante dessas perturbações. A relação entre a variação do comprimento de onda de Bragg e as perturbações externas, neste caso deformação mecânica e temperatura, está expressa na seguinte equação [Othonos99]:

$$\Delta\lambda_B = \left( 2\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial P} + 2n_{eff} \frac{\partial \lambda}{\partial P} \right) \Delta P + \left( 2\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + 2n_{eff} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (3.2)$$

onde o primeiro termo da equação, dependente de  $\Delta P$ , representa a variação do comprimento de onda de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ) associada a deformações mecânicas e o segundo termo da equação, dependente de  $\Delta T$ , representa a variação desse mesmo parâmetro com o diferencial de temperatura em relação ao tempo.

O trabalho desta dissertação incide apenas na variação de temperatura, pressupondo que não existem solicitações mecânicas nas fibras que provoquem deformações nas redes de Bragg. Deste modo o termo ( $\Delta P$ ) é igual a zero, e a equação (3.2) é equivalente a:

$$\Delta\lambda_B = \left( 2\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + 2n_{eff} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (3.3)$$

A equação anterior pode ainda ser expressa pela seguinte expressão:

$$\Delta\lambda_B = S_T \Delta T \quad (3.4)$$

onde  $S_T$  representa a sensibilidade da rede de Bragg à temperatura, dada por:

$$S_T = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad (3.5)$$

em que:

$$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \left( \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (3.6)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{eff}} \left( \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \quad (3.7)$$

onde  $\alpha_\Lambda$  representa o coeficiente de expansão térmica ( $\approx 0.55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  para a sílica), e  $\alpha_n$  o coeficiente termo-ótico ( $\approx 8.6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  para a sílica dopada com germânio). Para o caso de uma rede de Bragg com um comprimento de onda característico centrado em 1550 nm o valor expectável para a sensibilidade é  $14.2 \text{ pm}^\circ\text{C}^{-1}$  [Othonos99].

## 3.5 Aplicação das redes de Bragg como sensores

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos vários projetos de investigação em engenharia que se baseiam na tecnologia das redes de Bragg para medição de variações de temperatura, deformações mecânicas, entre outros parâmetros. O isolamento elétrico que confere uma segurança inerente à sua utilização, a imunidade a interferências eletromagnéticas e baixas perdas de transmissão de dados a dezenas de quilómetros são algumas das vantagens que justificam a utilização crescente desta tecnologia [Mra13]. Seguidamente serão apresentados alguns exemplos da aplicação das redes de Bragg como sensores de temperatura.

### 3.5.1 Medição da temperatura no setor do petróleo

No projeto “Termômetro de Alta Temperatura (0-400 °C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor do Petróleo” foram aplicadas FBGs em colunas de destilação. O reduzido tempo de resposta associado a esta tecnologia relativamente a termopares do tipo K, a possibilidade do sistema de leitura operar remotamente e a longas distâncias são algumas das vantagens mencionadas neste projeto. A gama de temperaturas de trabalho nas colunas de destilação varia entre os 250 °C e os 350 °C, valores perfeitamente admissíveis para operar com FBGs. Já outros sistemas comerciais de sensores testados no projeto apresentavam limitações na gama de temperaturas. Para além de necessitarem de tratamento e amplificação do sinal, requeriam ainda que o módulo de deteção do sinal ficasse nas proximidades, devido às perdas por transmissão inerentes aos sinais elétricos, entre outros [Silva03].



### 3.5.2 Medição da temperatura em baterias de lítio em tempo real com sensores de Bragg

Com o uso crescente de baterias de lítio, nomeadamente em veículos automóveis elétricos e híbridos, surge a necessidade de garantir a segurança associada ao uso constante deste tipo de dispositivos. Um dos fatores mais relevantes para a segurança é a estabilidade da temperatura e da pressão interna [Kim11]. Uma grande preocupação reside no possível aumento significativo da temperatura nos ciclos de carga e/ou descarga da bateria [Doh08].

Nesta aplicação, ilustrada na Figura 3.5, os sensores FBG foram caracterizados termicamente com o auxílio de termopares localizados em pontos semelhantes e foi obtida uma resposta linear. Os sensores foram posteriormente testados em condições normais e anormais de operação da bateria. Foram detetadas variações de 0,1 °C pelos sensores FBG que também apresentaram boa resposta térmica a cargas dinâmicas quando comparados com os termopares [Yang13].

Esta tecnologia de baixo custo relativo baseado em sensores FBG provou ser uma boa ferramenta para identificar zonas críticas do ponto de vista térmico em baterias de lítio. Outro fator preponderante é a obtenção de dados de temperatura em diferentes sensores através de uma única fibra ótica [Yang13].

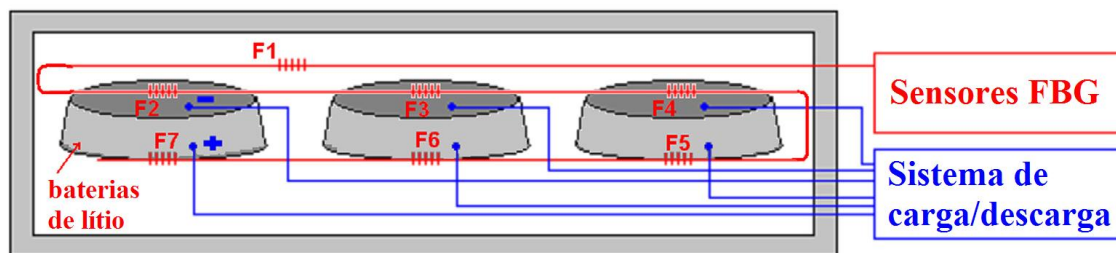
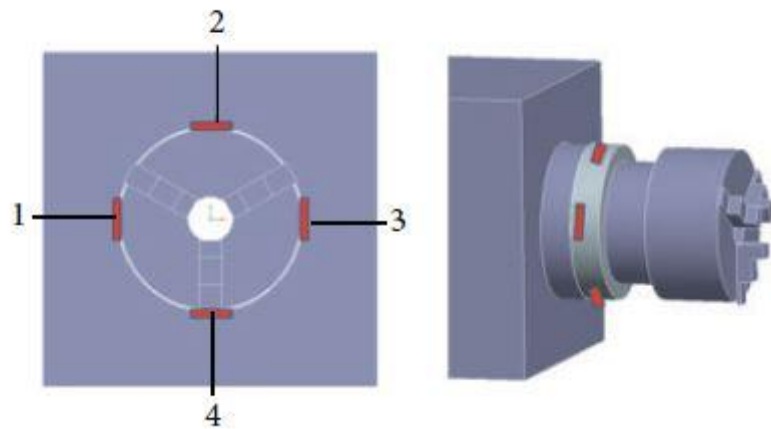


Figura 3.5 - Representação dos sensores FBG aplicados em baterias de lítio (adaptado de [Yang13]).

### 3.5.3 Aplicação de sensores de Bragg no eixo da árvore de uma máquina CNC

O gradiente de temperatura gerado no eixo da árvore de uma máquina CNC (Controlo Numérico Computadorizado) influencia a precisão da ferramenta na fase da operação (fresagem, furação, mandrilagem, etc.). A principal consequência da imprecisão da ferramenta é a produção de peças defeituosas com desvios superiores aos toleráveis.

Vários métodos foram propostos para medir as temperaturas no eixo da árvore, no entanto os métodos convencionais baseiam-se em sinais elétricos, que são afetados pelo ruído eletromagnético gerado pelo funcionamento da máquina. Deste modo, a solução encontrada baseou-se em sensores de Bragg em fibra ótica. Com esta aplicação constatou-se que a distribuição de temperaturas antes de a máquina operar é uniforme, mas que após as operações o gradiente de temperatura já não é uniforme, de acordo com a localização dos sensores de Bragg, ilustrada na Figura 3.6 [Liu13].



**Figura 3.6 - Localização dos sensores FBG (pontos 1-4) [Liu13].**

## Capítulo 4 – Simulação numérica

---

A simulação numérica foi realizada através do *software Autodesk Moldflow Synergy 2012* e teve como objetivo conhecer os valores dos parâmetros que melhor se adequam à injeção do Polipropileno (PP) para o caso específico deste trabalho, com o molde e a máquina de injeção pré-definidos. Normalmente, este tipo de estudo de simulação ocorre no início de um projeto, do qual ainda não se conhece nem a geometria do molde (número de cavidades, canais de alimentação, canais de arrefecimento), nem as características da máquina de injeção (força máxima de fecho, pressão máxima de injeção, capacidade de plasticização, etc).

### 4.1 Geração da malha

A partir do modelo importado do software de desenho 3D *CATIA.V5R19* foi gerada a malha em casca (*Dual Domain*), dado que a peça tem uma espessura constante de 3 mm (desenho técnico da peça disponível no Anexo A1). As propriedades da malha estão apresentadas na Tabela 4.1. Relativamente à peça que vai ser produzida, a malha é composta exclusivamente por elementos triangulares. No que diz respeito à razão de aspeto da malha, a referência do programa assegura que um critério de qualidade corresponde ao valor máximo inferior a 6, o que se verifica.

**Tabela 4.1 - Propriedades da malha em casca gerada (para uma peça).**

Parâmetros	Valores
Número de entidades	
Elementos triangulares	12908
Nós interligados	6456
Razão de aspeto	
Máxima	5,9
Média	1,55
Mínima	1.16
Área (cm <sup>2</sup> )	42,1433
Volume (cm <sup>3</sup> )	5,02118

A representação da peça com a malha criada pelo *software* de simulação numérica pode ser observada na Figura 4.1.

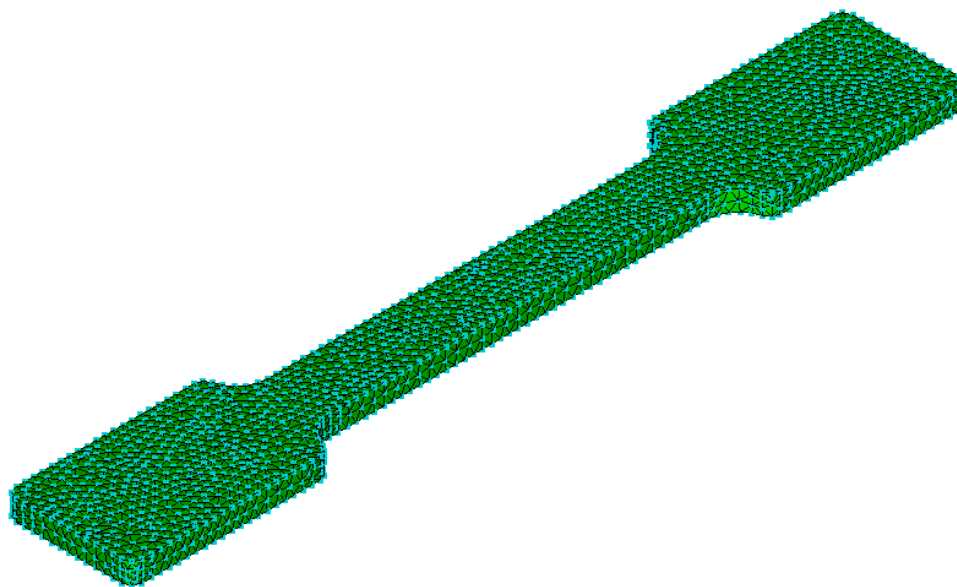


Figura 4.1 - Representação da peça com a malha gerada.

## 4.2 Definição do conjunto simulado

Além da malha em casca (em detrimento da malha 3D), outra das simplificações executadas nesta simulação decorre da geração da multi-cavidade para duas peças. A geometria do molde dispõe as duas peças de forma não-alinhada, como se verifica na Figura 4.2, enquanto que no programa de simulação numérica a criação da segunda peça implica automaticamente o alinhamento com a primeira. O pormenor que se encontra entre as duas peças corresponde aos canais de distribuição do sistema de alimentação. O desalinhamento das peças provoca uma diminuição das distâncias entre os pontos de injeção de cada peça e o canal de alimentação, representado nesta figura pelo círculo central.

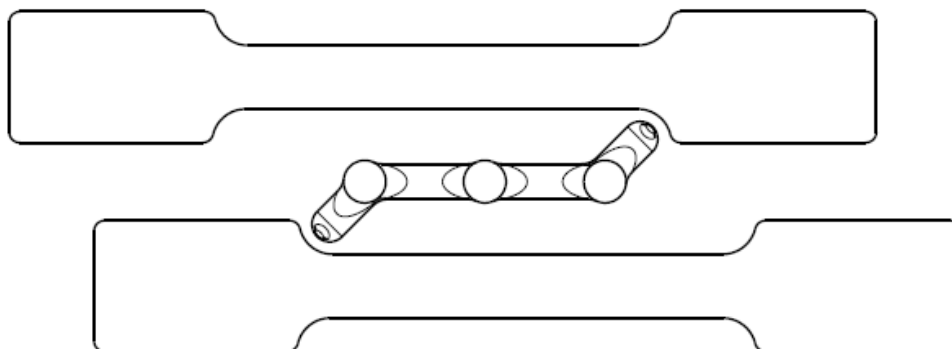
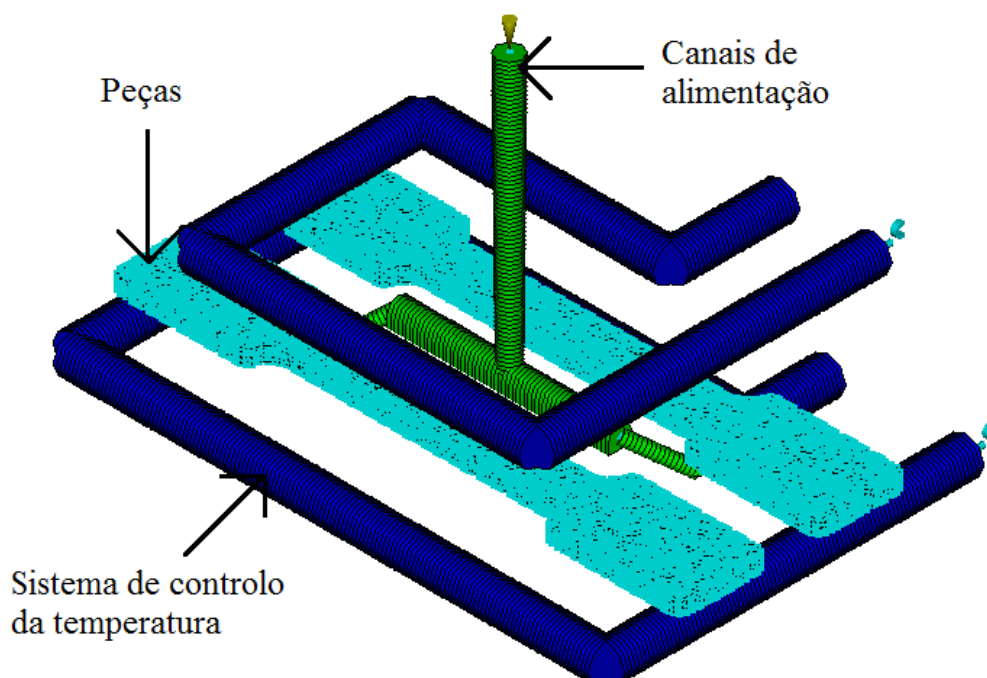


Figura 4.2 - Representação parcial da vista da placa do molde onde as peças são produzidas.

A partir do modelo com as duas simplificações já mencionadas, geraram-se os sistemas de alimentação e de controlo de temperatura para efetuar a simulação numérica com todos estes parâmetros a serem contabilizados. Com estas características no modelo de simulação foi possível estimar em diferentes locais (ao longo das peças, canais de alimentação, canais do sistema de controlo da temperatura (SCT), face moldante em contacto com o material polimérico) a temperatura, a pressão, o tempo das várias fases do ciclo, deformações na peça, etc.

O sistema que foi simulado no *software*, composto pelas duas peças, canais de alimentação e canais de controlo de temperatura está representado na Figura 4.3. O sistema de alimentação é constituído por canais frios e os alimentadores possuem secção transversal semicircular com diâmetro de 5 mm com três poços frios. Os canais do SCT têm um diâmetro constante de 8 mm. O sistema de ataque presente no molde classifica-se como injeção num extrator, muito semelhante à injeção submarina, mas que recorre ao pino extrator para introduzir o termoplástico na cavidade do molde.



**Figura 4.3 - Representação do sistema simulado numericamente no *software*.**

O material escolhido para realizar os ensaios experimentais foi o PP (Polipropileno). Os motivos desta escolha estão descritos na secção 5.3.2 deste documento. A partir desta escolha seleccionou-se no *software* a matéria-prima para realizar as simulações. As principais propriedades do material eleito estão apresentadas na Tabela 4.2. A designação comercial deste polímero comercializado pela A. Schulman é *Polyfort PP 1329-1 N*.

**Tabela 4.2 - Principais propriedades do material selecionado para as simulações.**

Parâmetros	Valores
Temperatura de injeção (°C)	200 – 280
Temperatura de extração (°C)	93
Temperatura da superfície moldante (°C)	20 – 80
Tensão de corte máxima (MPa)	0,26
Calor específico a 210 °C (J/kg·K)	2730,2
Densidade no estado sólido (g/cm <sup>3</sup> )	0,92889
Densidade no estado fundido (g/cm <sup>3</sup> )	0,7751

A máquina de injeção escolhida para o estudo de simulação baseou-se no modelo genérico do *software* no qual foram editadas as propriedades principais, entre as quais, força máxima de fecho, capacidade máxima de injeção e pressão máxima do circuito hidráulico. A Tabela 4.3 apresenta as características que foram aplicadas na máquina injetora usada na simulação. Os valores mencionados basearam-se nas propriedades da máquina de injeção presente no Departamento de Engenharia Mecânica da UA (*Inautom Euro Inj Série D – D65*) usada para fazer os ensaios reais descritos na secção 5.3.2 deste documento.

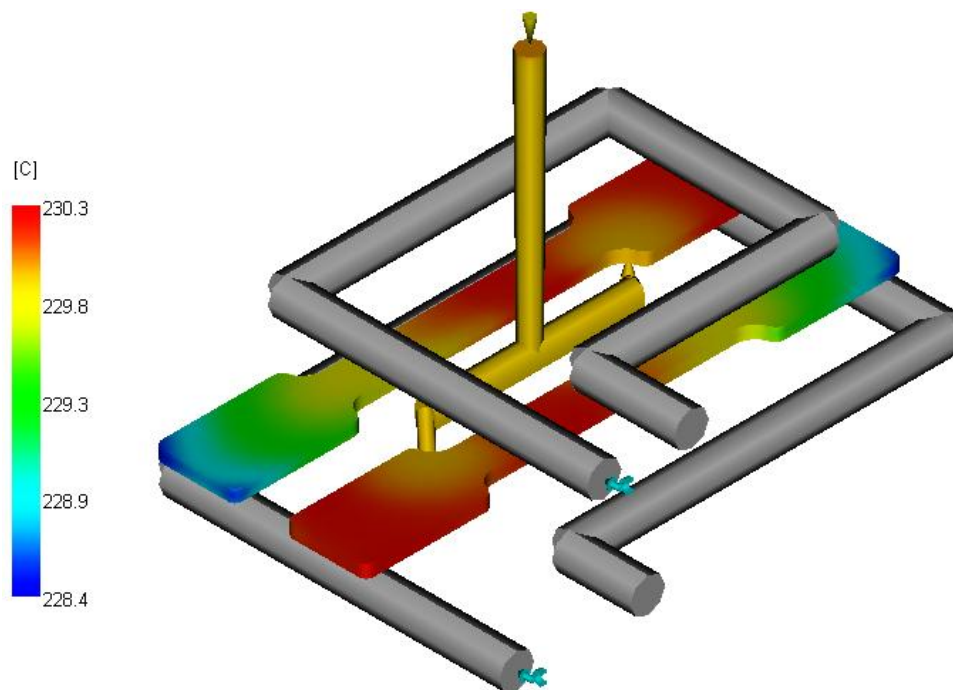
**Tabela 4.3 - Propriedades da máquina de injeção usada no software de simulação.**

Parâmetros	Valores
Capacidade máxima de injeção (cm <sup>3</sup> /s)	5.000
Pressão máxima do circuito hidráulico (MPa)	18
Força máxima de fecho (kg)	65.000

## 4.3 Resultados da simulação

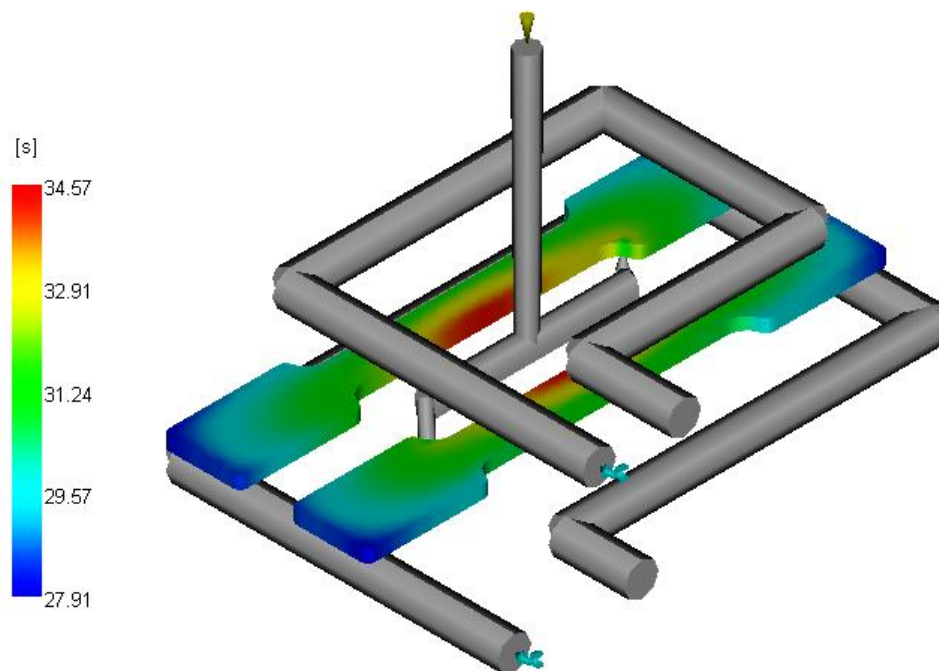
Com o sistema todo definido efetuou-se a simulação da injeção (*fill*), da compactação (*pack*) e do arrefecimento (*cool*). Muitos dos parâmetros introduzidos *a priori* da simulação estão quantificados nas seguintes figuras, tais como as temperaturas de injeção, de extração e do SCT. Como se verifica a partir da Figura 4.4, a temperatura de injeção escolhida foi 230 °C. A partir

desta figura consegue-se prever a distribuição de temperaturas ao longo da peça nos instantes em que o material polimérico vai preenchendo a cavidade.



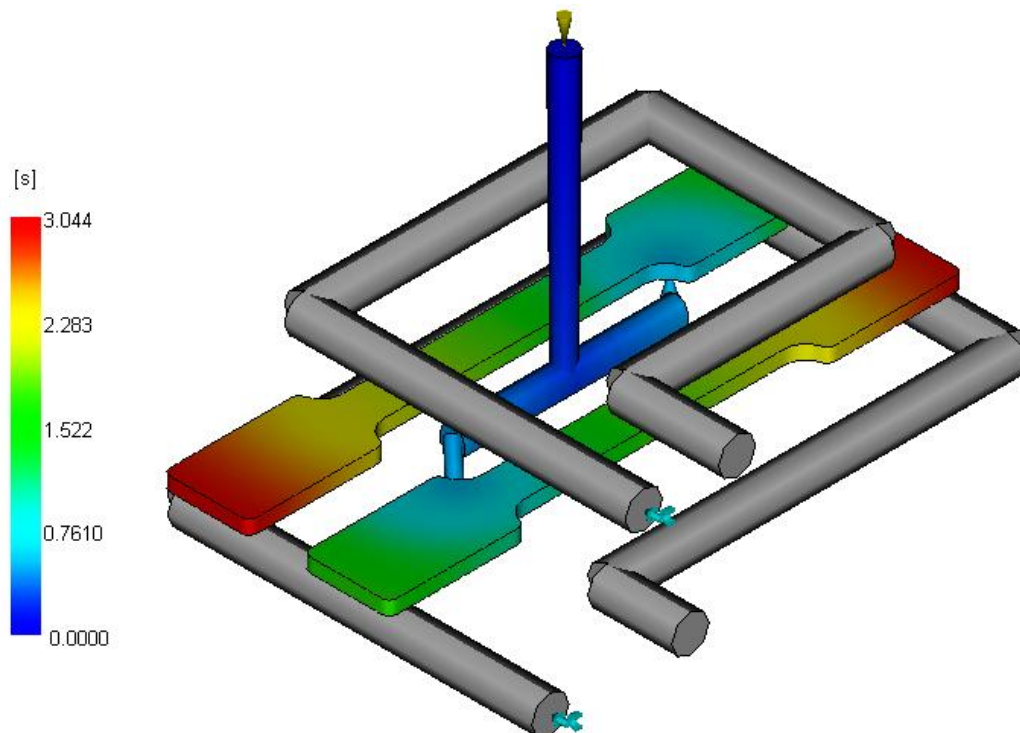
**Figura 4.4 - Representação da simulação da temperatura da frente de enchimento na injeção.**

A partir da simulação foi calculado o tempo necessário para atingir a temperatura de extração de acordo com a localização ao longo da peça. Como se verifica na Figura 4.5, o valor máximo situa-se nos 35 segundos. Este cálculo já tem ponderada a ação de remoção do calor auxiliada pelo SCT. Caso não estivesse instalado no molde o SCT, seriam precisos aproximadamente 48 segundos para cada ciclo de moldação se completar.



**Figura 4.5 - Representação do tempo necessário para atingir a temperatura de extração.**

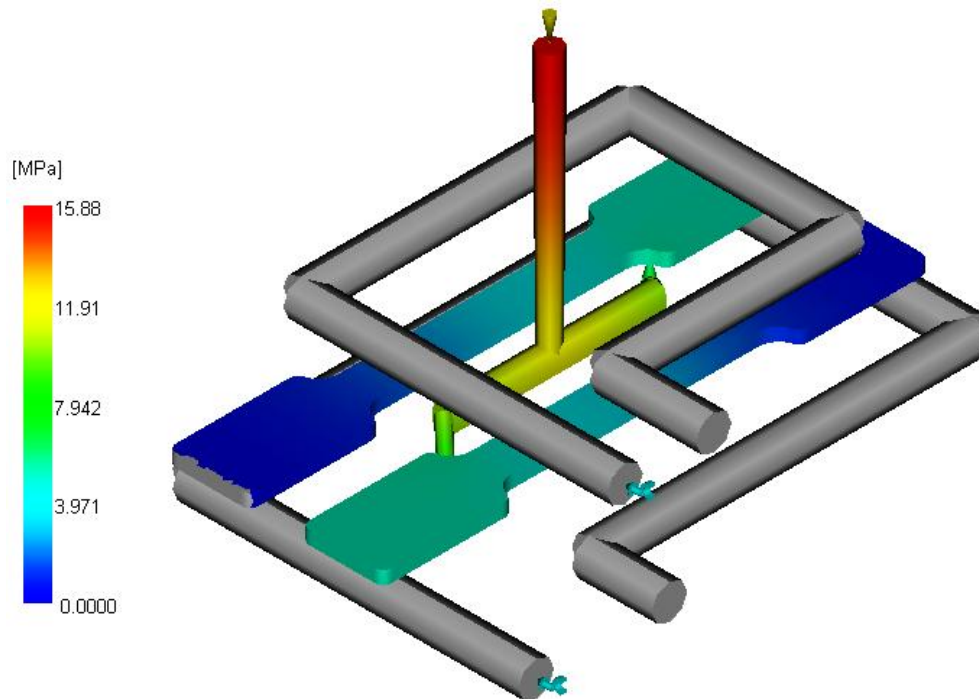
No caso particular da fase de injeção, o tempo estimado para o total preenchimento da cavidade moldante é de aproximadamente 3 segundos, como se verifica na Figura 4.6. Como seria expectável, o tempo é superior nos locais da peça mais afastados do ponto de injeção.



**Figura 4.6 - Representação do tempo de enchimento.**

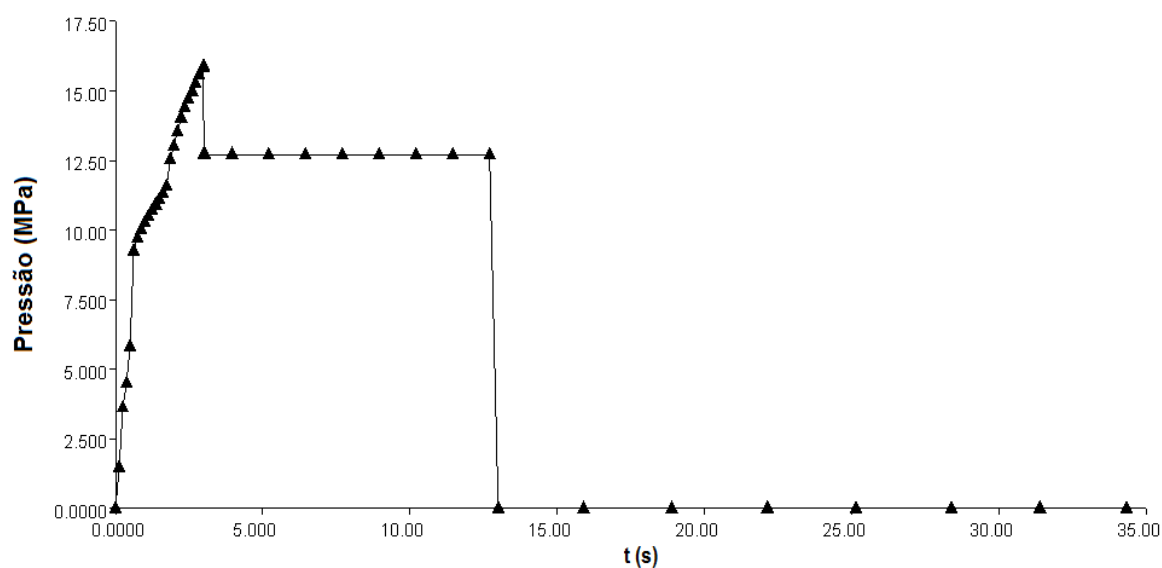


Para que toda a cavidade do molde seja preenchida corretamente é necessário fornecer uma pressão mínima na injeção do material. A Figura 4.7 apresenta o diferencial de pressões ao longo do sistema composto pelos canais de injeção e pela peça. A partir desta imagem conclui-se que a pressão de injeção (variável operatória a introduzir na máquina aquando dos ensaios) é aproximadamente 16 MPa.



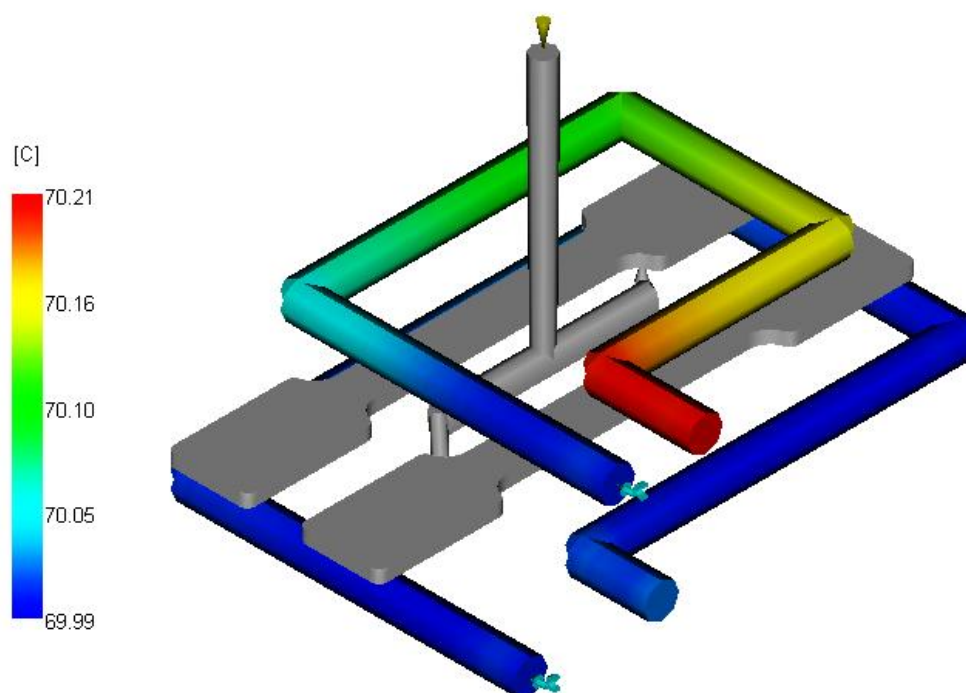
**Figura 4.7 - Representação dos valores da pressão de acordo com a localização no sistema.**

A pressão máxima exercida no bico da injetora ocorre nos instantes iniciais do ciclo, quando se dá a injeção do material termoplástico para o molde. No entanto, ao longo do ciclo é exercida uma segunda pressão, relativamente inferior, denominada pressão de manutenção. O gráfico com os níveis da pressão ao longo do tempo de ciclo é apresentado na Figura 4.8.



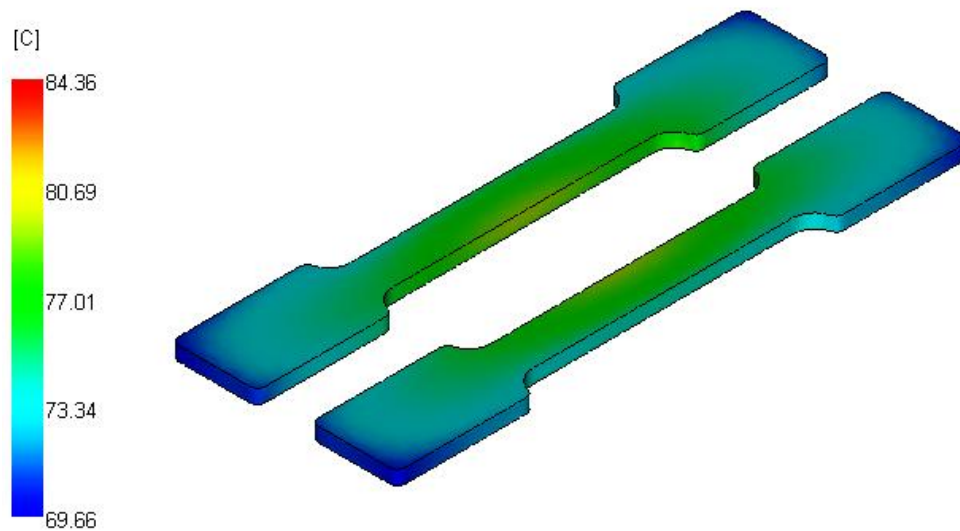
**Figura 4.8 - Gráfico da pressão no bico da injetora ao longo do tempo de ciclo.**

A água que entra nos canais de refrigeração do molde encontra-se a 70 °C. Ao retirar calor do molde na fase do arrefecimento da peça, a água sai deste com uma temperatura ligeiramente superior. Tal facto é constatado a partir da Figura 4.9.



**Figura 4.9 - Representação das temperaturas ao longo dos canais do SCT.**

A partir da ação do SCT foi estimada a temperatura na superfície moldante em contacto com as peças. Na Figura 4.10 é apresentada essa estimativa. A maior parte da secção em contacto com as peças tem uma temperatura entre os 70 e os 80 °C.



**Figura 4.10 - Representação da temperatura na superfície moldante.**

## 4.4 Conclusão

A simulação efetuada permitiu prever certos comportamentos térmicos no molde e sobretudo nas peças, estimar as variáveis operatórias a usar nos ensaios reais na máquina de injeção e também estudar outros fatores menos relevantes e cujos resultados não foram apresentados (p. ex. os níveis de empeno, contração volumétrica, linhas de soldadura, fluxos de água no SCT e percentagens de solidificação aquando da extração). Estes últimos fatores não foram pormenorizadamente apreciados por se tratar de um molde já concebido, ou seja, pelo molde não se encontrar na fase de projeto. Os parâmetros relacionados com a qualidade da peça também foram desprezados, visto não interessar para este trabalho o produto final, mas sim os valores recolhidos nos sensores térmicos. Ainda assim, as peças obtidas apresentavam qualidade, como se constata na Figura 5.16.

Portanto, a partir desta simulação passaram a estar praticamente definidas todas as variáveis operatórias. De referir ainda que alguns dos valores recolhidos nos resultados da simulação foram adaptados à realidade nos ensaios de injeção. No entanto, o contributo desta simulação foi relevante para antecipar e facilitar o trabalho futuro da injeção do PP na máquina presente no DEM-UA.



# Capítulo 5 – Trabalho Experimental

---

Para poder aplicar a tecnologia dos sensores FBG no molde de injeção plástica, vários foram os passos sequenciais necessários. Desde o processo de gravação das redes com recuso ao laser de KrF, passando pela caracterização térmica das redes de Bragg num forno tubular até à inclusão das fibras dentro do molde e consequentes ensaios térmicos. Estes passos estão descritos de forma detalhada nos seguintes subcapítulos.

Para qualquer uma das aplicações com sensores FBG descritas neste trabalho experimental, desde o acompanhamento da gravação das redes de Bragg até à utilização final no molde de injeção plástica, foi necessária a utilização de um sistema de interrogação das fibras óticas, neste caso *sm125-500 da Micron Optics* e o respetivo *software MOI-ENLIGHT*, com o intuito de adquirir os espetros das redes de Bragg, ou então monitorizar o comprimento de cada uma delas. Só assim era possível observar o comportamento das redes de Bragg e a influência da temperatura nos seus comprimentos de onda. Este sistema tem uma taxa de aquisição de 2 Hz e uma resolução em comprimento de onda de 1 pm.

## 5.1 Análise pré-experimental

No início dos trabalhos experimentais, ainda na fase de planeamento, chegou-se à conclusão que a tecnologia dos sensores FBG não podia ser aplicada em posições de microinjeção. Esta impossibilidade deve-se à condição frágil da fibra ótica que não permite raios de curvatura apertados. Além de provocar perdas no sinal ótico [Martins09], em casos extremos origina o corte transversal da fibra. Por isso, esta tecnologia de sensores foi aplicada num molde simples de duas placas. Os sensores foram introduzidos na placa fixa como se verifica pela Figura 5.4.

A implementação da monitorização térmica do processo de injeção plástica com redes de Bragg foi antecedida pela realização de um planeamento experimental com o intuito de discutir aspetos relacionados com:

1. Número de fibras óticas;
2. Número de redes de Bragg a usar;
3. Em que placa ou placas do molde iriam estar alojadas as fibras;
4. Posições das fibras e também das redes;
5. Como iriam ser colocadas as fibras no molde sem danificar ou partir.

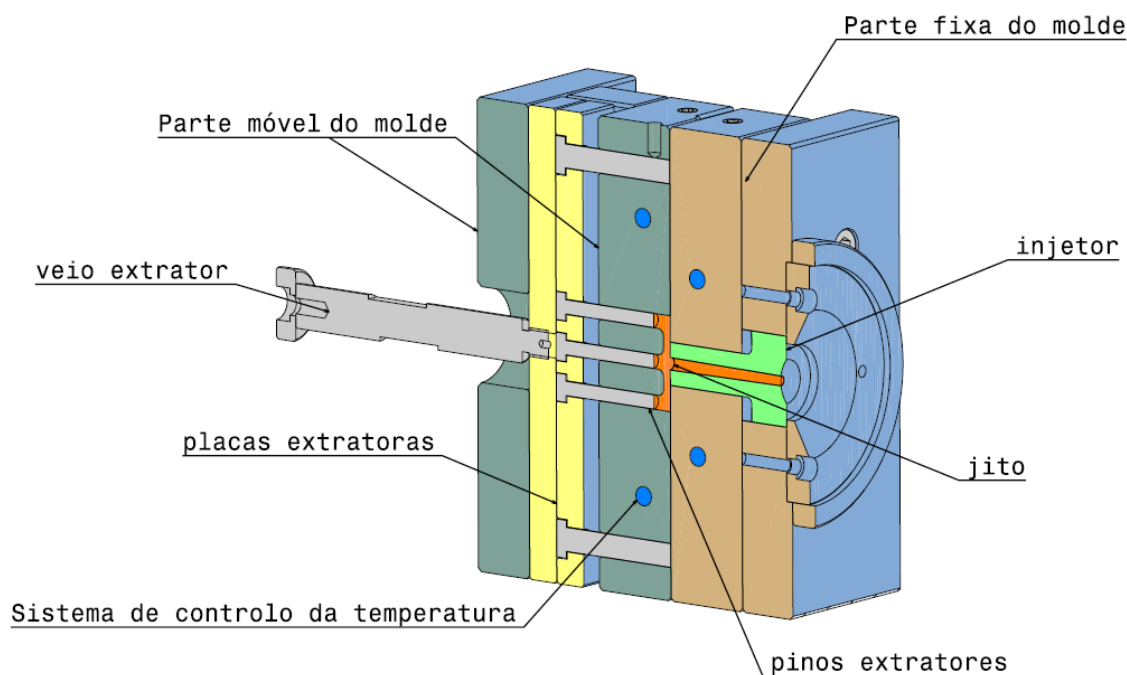
Os primeiros dois pontos ficaram condicionados pela geometria do molde. Decidiu-se colocar as fibras com uma posição transversal às peças, como se comprova na Figura 5.2. Deste modo, as fibras estão sobrepostas às duas peças que compõem a cavidade do molde. Optou-se por usar 4 fibras óticas com um total de 12 sensores de temperatura, sobrepostos às peças, por ficar garantida uma recolha representativa do comportamento térmico do molde no momento da injeção

plástica. No caso das duas fibras centrais (B e C) justificou-se a utilização de apenas 2 redes de Bragg em cada fibra, pois, na secção estreita da peça a inclusão de mais do que um sensor de temperatura para uma largura de 9 mm não pareceu adequada. Por isso, no caso das fibras B e C, os sensores foram colocados sobre o ponto de injeção de cada peça e sobre o centro da secção estreita.

No que diz respeito às restantes fibras (A e D) a escolha do número de redes de Bragg não se prendeu com alguma limitação geométrica ou logística. Depois de se ter optado pela localização destas fibras junto das extremidades das peças, decidiu-se ter em cada fibra 3 sensores sobrepostos a uma peça e 1 a outra. Deste modo, ambas as fibras têm 4 sensores de temperatura.

No ponto nº 3 optou-se pela escolha de apenas colocar as fibras na placa fixa do molde, isto é, na placa da cavidade (desenho técnico da placa da cavidade disponível no Anexo A2) que fica do lado da injeção. Deste modo, os movimentos de abertura e fecho do molde não interferem com as fibras óticas.

O ponto nº 4 foi o que levantou mais questões para ser encontrada a solução. A posição das fibras e das redes na placa fixa teria de ser ajustada ao molde em causa, para assim registar os valores de temperatura nos locais mais pertinentes. Pela geometria do molde presente na Figura 5.1 a placa fixa é perfeitamente lisa (sem relevo) no plano de partição à exceção do furo central de diâmetro 18 mm, onde encaixa o injetor. Já a placa móvel tem o baixo-relevo que dá a forma das peças e ainda os canais de distribuição e os ataques do sistema de canais frios de injeção.

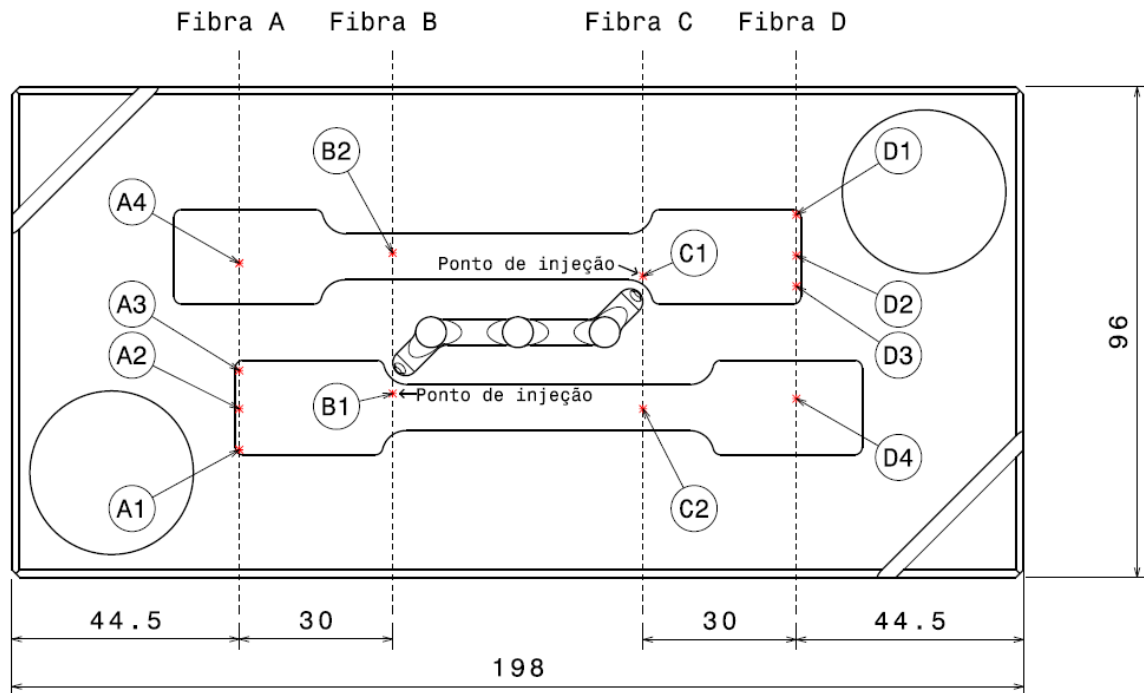


**Figura 5.1 - Representação em corte da perspectiva isométrica do molde de injeção utilizado.**

O molde utilizado possui duas cavidades, ou seja, por cada ciclo de injeção são produzidas duas peças. Portanto, estando as fibras alojadas na placa fixa do molde, seria preferível medir as temperaturas nas zonas onde o material termoplástico está em contacto com o plano de partição.

Com 4 fibras, seria necessário realizar outros tantos furos passantes no molde que não estivessem muito longe do plano de partição. Essa solução foi encontrada ao realizar 4 furos de 0.5 mm de diâmetro a 3 mm da face (distância entre plano de partição e o plano definido pelos eixos dos 4 furos). Pelas características geométricas do molde, decidiu-se que duas das redes estariam sobrepostas aos pontos de injeção nas duas peças. A partir deste requisito construiu-se o

desenho com a posição de todas as redes que pode ser observado na Figura 5.2. Nesta figura, a placa está representada ao baixo. Com o molde montado na máquina de injeção, a face do lado esquerdo fica orientada para cima. As fibras entram no molde pela face de baixo, do ponto de vista desta figura. A denominação de cada sensor está representada na figura através dos balões com linhas de chamada que apontam para o respetivo local.

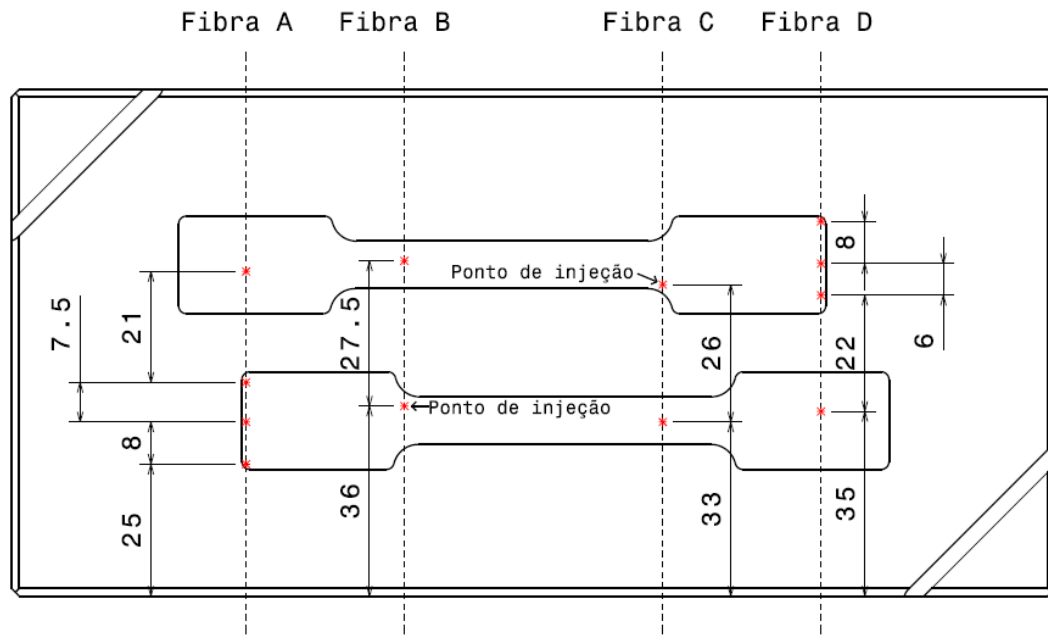


**Figura 5.2 - Vista frontal da placa da bucha com as posições das redes de Bragg sobrepostas e suas identificações (distâncias em mm).**

De referir que, tendo os pontos de injeção de cada peça como referenciais, as redes estão em posições semelhantes entre uma peça e outra. É expectável, por exemplo, que a resposta do sensor A1 seja idêntica à do D1, e o mesmo acontecerá com B1 e C1.

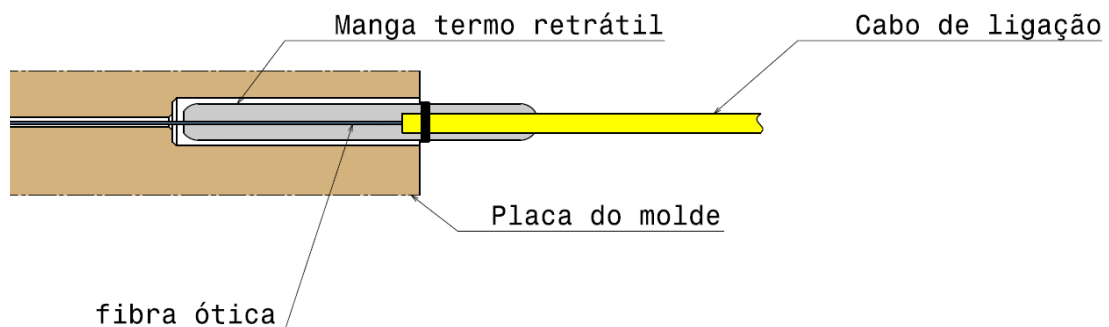
Para não sobrecarregar a Figura 5.2 com mais cotas, é apresentada a Figura 5.3 com as distâncias entre os sensores da mesma fibra ótica e também entre a face de encaixe no molde e o primeiro sensor.

O desenho técnico da placa da bucha está disponível no Anexo A3.



**Figura 5.3 - Representação com as cotas entre os sensores (distâncias em mm).**

Por fim, o ponto nº 5 foi solucionado com recurso à aplicação de mangas termo retráteis na zona da fusão das fibras onde ocorre a transição entre o cabo de ligação ao sistema de interrogação e a fibra sem revestimento. Como se observa na Figura 5.4 a manga (representada a cinzento) envolve a fibra na zona da mudança entre o cabo que liga ao aparelho (representado a amarelo) e a fibra sem revestimento com apenas 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro. As placas do molde, para alojarem estas mangas sofreram alargamentos nos furos de 0.5 mm para 2.8 mm de diâmetro, com 13 mm de profundidade. As mangas foram marcadas transversalmente com fita isolante de cor escura (representada na seguinte figura), para assegurar as localizações dos sensores nos sítios desejados. A fita marcava o encosto da fibra com a face exterior do molde.



**Figura 5.4 - Representação em corte (ampliada 5x) do encaixe da fibra na placa do molde.**



## 5.2 Produção dos sensores FBG

As redes de Bragg utilizadas no trabalho experimental desta dissertação foram gravadas em fibra ótica fotossensível *FiberCore PS 1250/1500* pelo método da máscara de fase recorrendo ao sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações – Polo de Aveiro (IT), apresentado na secção 3.3 deste documento. Na Figura 5.5 é apresentada uma fotografia do referido sistema. Os parâmetros de gravação utilizados foram: frequência do laser 500 Hz, energia 2 mJ, tempo de gravação 15 s e comprimento físico das redes 2 mm.

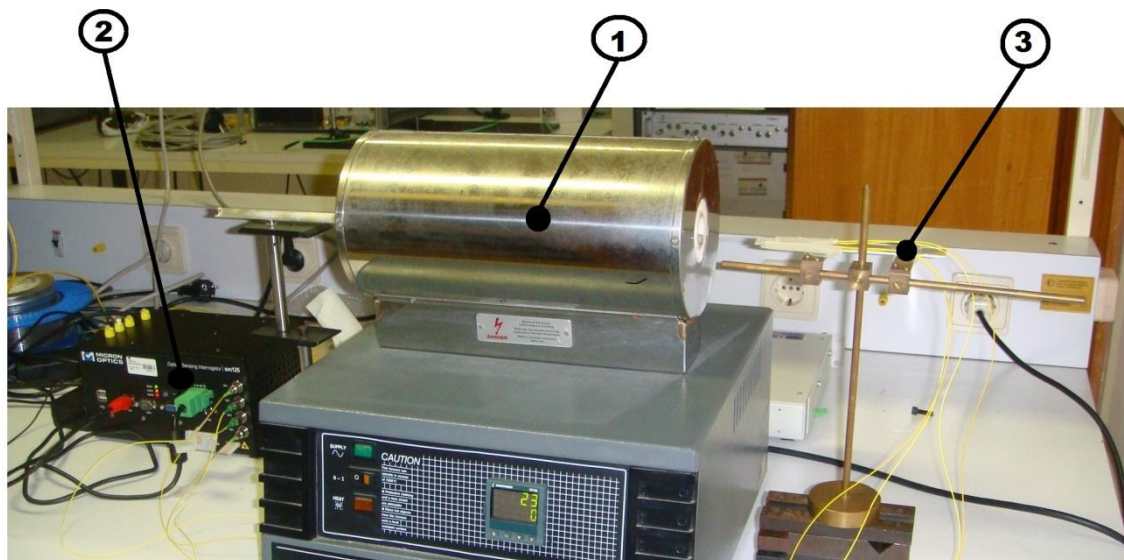


**Figura 5.5 - Sistema de gravação com laser de excímeros presente no IT.**

De seguida, com uma resistência térmica, neste caso um aparelho de soldar estanho, foram determinadas as localizações exatas de cada rede ao longo das fibras e identificadas com marcador de tinta permanente. Assim, conhecendo com rigor as distâncias entre as redes de Bragg é possível estabelecer a correta posição da fibra no molde, para que os sensores coincidam com os locais pretendidos. Caso contrário, o risco de algum sensor não estar sobreposto à peça no molde era considerável. A técnica usada consistiu em aproximar o aparelho de soldar à fibra ótica e percorrê-la lentamente, verificando em tempo real se alguma das redes gravadas alterava o seu comprimento de onda de Bragg. Deste modo assegurou-se o correto funcionamento da rede de Bragg como sensor de temperatura. Optou-se por este procedimento por ser o mais prático para a finalidade pretendida, pois o aparelho em alguns segundos atinge temperaturas superiores a 150 °C e concentra esse calor na pequena área de superfície da ponta do aparelho. Este ensaio permitiu ainda corrigir a localização das redes em relação à posição destas estabelecidas na análise pré-experimental. As cotas apresentadas na Figura 5.3 resultam dessa retificação.

Por fim, com o intuito de caracterizar termicamente as redes gravadas na fibra, foram realizados ensaios num forno tubular (*Carbolite, MTF 12/25A*) controlando a temperatura. O ensaio iniciou com a aquisição dos dados dos espectros das 4 fibras à temperatura ambiente e de seguida foi aumentada a temperatura até aos 50 °C, tendo-se aguardado aproximadamente 10 min para

estabilizar. Passado esse tempo foram novamente recolhidos os espectros. A partir dos 50 °C repetiu-se o procedimento anterior, aumentando-se a temperatura progressivamente até aos 300 °C, com um incremento de 25 °C, perfazendo um total de 12 valores de temperatura. Na Figura 5.6 pode observar-se a montagem usada no referido ensaio experimental.



**Figura 5.6 - Montagem experimental usada na caracterização térmica das redes de Bragg – 1: forno tubular; 2: sistema de interrogação; 3: Fibras óticas contendo redes de Bragg gravadas.**

Com os resultados obtidos neste ensaio foi possível determinar a sensibilidade térmica de cada rede de Bragg, ou seja, a variação do comprimento de onda de cada rede por cada grau Celsius (Equação (3.4)).

Durante a experiência de caracterização dos sensores FBG, o comprimento de onda das várias redes tende a aumentar de forma constante com o aumento da temperatura. Na Figura 5.7 estão sobrepostos os espectros a temperaturas diferentes das quatro redes de Bragg de uma fibra ótica. Os pontos recolhidos correspondem aos extremos de temperatura da experiência de caracterização. A partir dos resultados presentes no referido gráfico pode-se observar que os picos que representam cada um dos 4 sensores deslocaram-se para comprimentos de onda superiores, com um incremento praticamente igual entre si. Este deslocamento segundo o eixo das abcissas é causado pelo aquecimento.

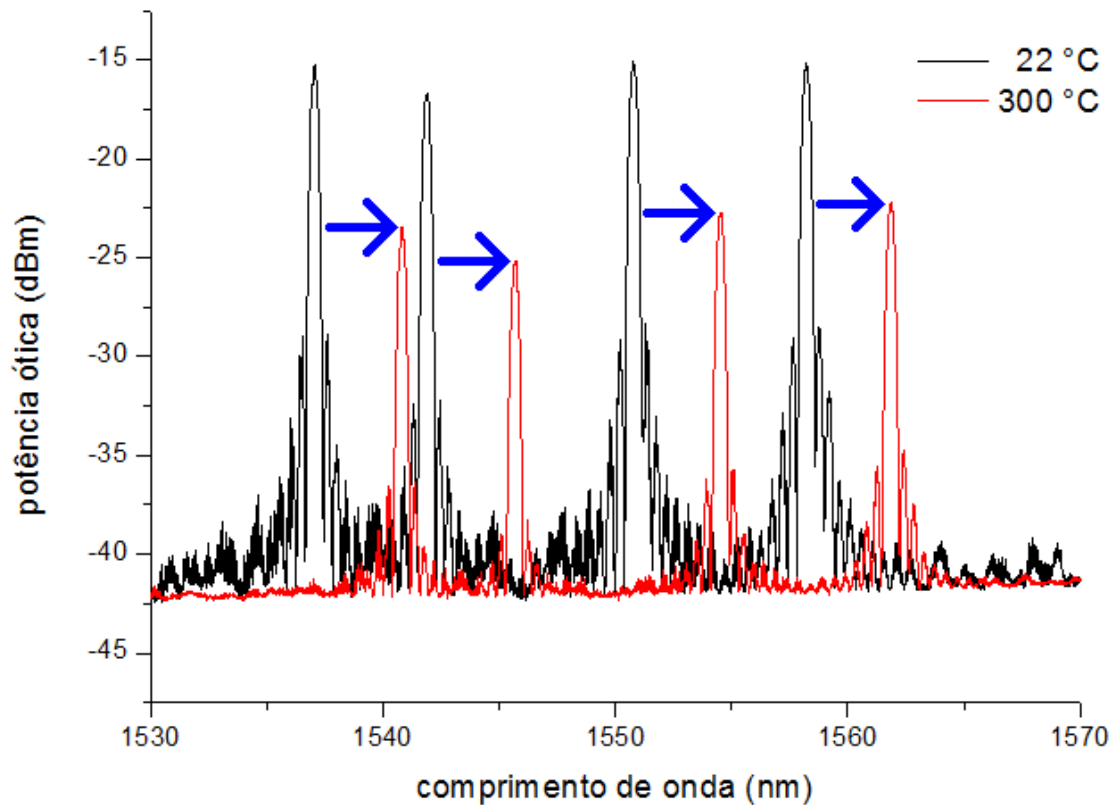
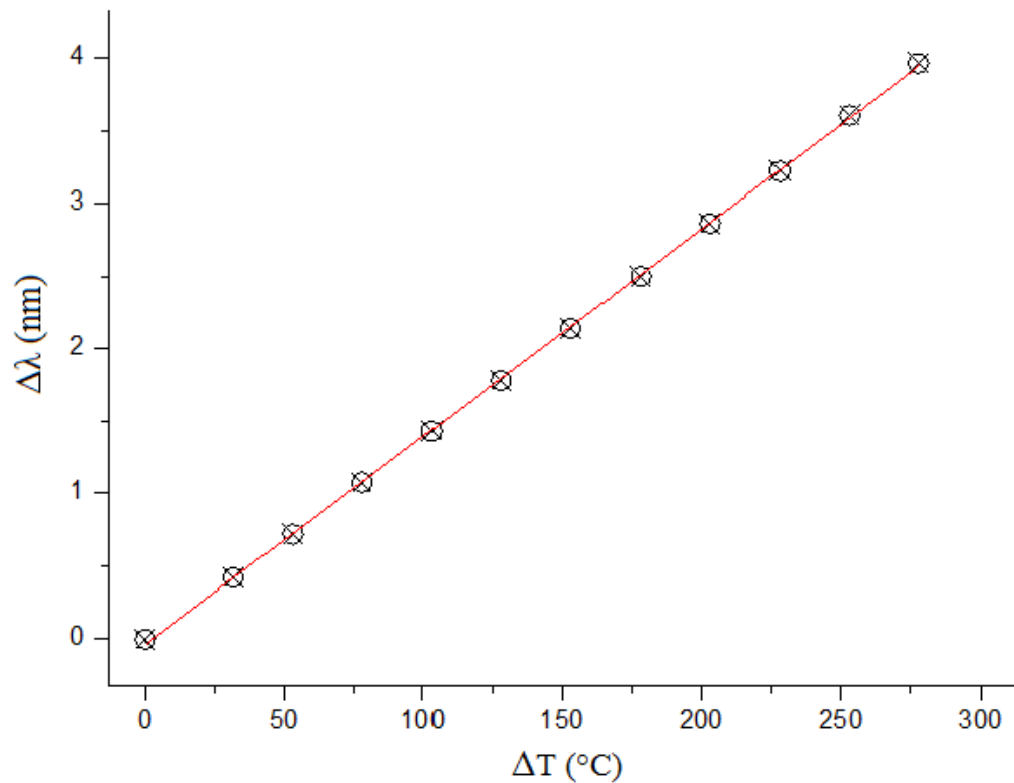


Figura 5.7 - Espectro de reflexão de 4 redes de Bragg a 22 e a 300 °C.

Com a aproximação dos picos observados graficamente na Figura 5.7 a curvaturas gaussianas foi possível determinar a abcissa correspondente ao centro da curva. Este tratamento de dados foi realizado para cada uma das temperaturas analisadas e para cada um dos 12 sensores de Bragg utilizados. De seguida, dispuseram-se graficamente, para cada rede, os pontos correspondentes à variação do comprimento de onda com a respetiva diferença de temperatura e aplicou-se uma regressão linear.

No gráfico presente na Figura 5.8 estão dispostos os pontos obtidos experimentalmente e o respetivo ajuste linear aos mesmos, neste caso para o sensor C2. A função resultante da regressão linear é equivalente à equação (3.5), logo, o declive da reta obtida corresponde ao coeficiente de sensibilidade térmica da própria rede ( $S_T$ ).



**Figura 5.8 - Gráfico da regressão linear dos pontos obtidos na experiência de caracterização térmica para o sensor C2.**

Na Tabela 5.1 estão expressos os valores da sensibilidade térmica de cada sensor. Nas 12 regressões lineares efetuadas, os pontos experimentais encontram-se praticamente sobre a linha da reta gerada. Tal facto é comprovado pelo valor mínimo de 0,99973 para os coeficientes quadráticos de correlação linear várias das regressões efetuadas. Os valores de sensibilidade determinados experimentalmente estão concordantes com a discussão apresentada na secção 3.4 deste documento e com os valores patentes na literatura [Othonos99]. Atendendo à resolução do sistema de interrogação utilizado (1 pm) é possível fazer-se medidas com uma resolução inferior a uma décima de grau Celsius.

Estes coeficientes de sensibilidade térmica determinados serão posteriormente utilizados para converter os valores de variação de comprimento de onda de Bragg obtidos durante o processo de injeção plástica em valores de temperatura.

**Tabela 5.1 - Valores dos coeficientes de sensibilidade térmica de cada sensor (unidades em pm/°C).**

Nº do sensor	Fibra A	Fibra B	Fibra C	Fibra D
1	14,47	14,45	14,14	13,99
2	14,41	14,20	14,32	14,20
3	14,34	—	—	14,31
4	14,02	—	—	14,45

## 5.3 Implementação das redes no molde de injeção plástica

### 5.3.1 Estudo do comportamento térmico do molde

Com o intuito de conhecer o comportamento térmico da placa de aço do molde antes de realizar os ensaios na máquina de injeção plástica, efetuou-se uma série de experiências. Nestes ensaios colocou-se a placa fixa do molde de injeção contendo as redes de Bragg, com a face do plano de partição voltada para baixo, sobre uma placa de aquecimento (*VWR Advanced, VMS-C7*). Analisando os resultados em tempo real das variações dos comprimentos de onda das redes de Bragg era possível saber se a temperatura registada nos sensores ainda estava a variar ou se já tinha alcançado um valor constante. Apenas após esta condição ser verificada se aumentava a temperatura para o valor seguinte. As temperaturas impostas no aparelho eletrónico para esta experiência foram de 50 a 150 °C inclusive, com incrementos de 25 °C.

A partir da Figura 5.9 pode-se observar o comportamento da placa do molde ao aquecimento promovido pela placa térmica. Os valores foram recolhidos com uma taxa de aquisição de 2 Hz. Durante o período de ensaio foram recolhidos valores de comprimentos de onda de cada rede de Bragg em função do tempo. Para que essa aquisição contemplasse a resposta dos 12 sensores foi necessário configurar previamente no *software* os parâmetros de deteção automática dos picos das redes.

De realçar que, pelo facto das fibras estarem dentro do molde, a 3 mm da face em contacto com a placa térmica, a variação de temperaturas causada pela ação do termostato (que ativa e desativa o aquecimento) também se verificou nos sensores, que registaram pequenas variações de temperatura.

Embora o gráfico presente na figura retrate a fase da experiência entre os 125 e os 150 °C, os valores recolhidos nos sensores não ultrapassaram os 121 °C. O sensor do termostato da placa de aquecimento estava colocado sobre a própria placa, o que justifica o facto de ter estado sempre a ativar e desativar o aquecimento que é detetado na leitura dos sensores de Bragg.

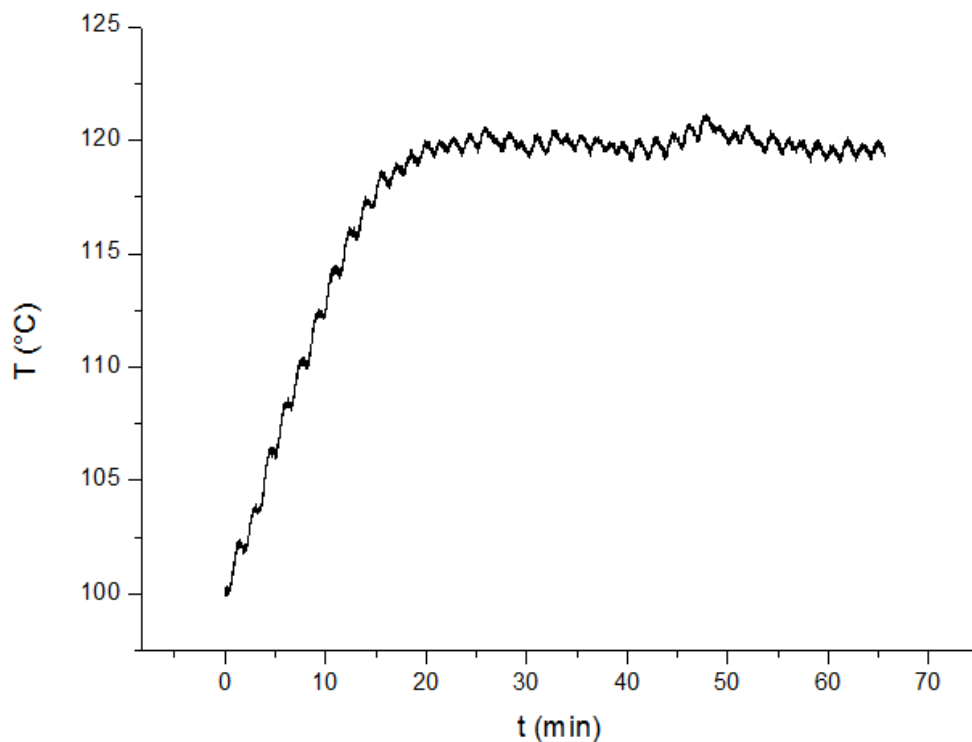


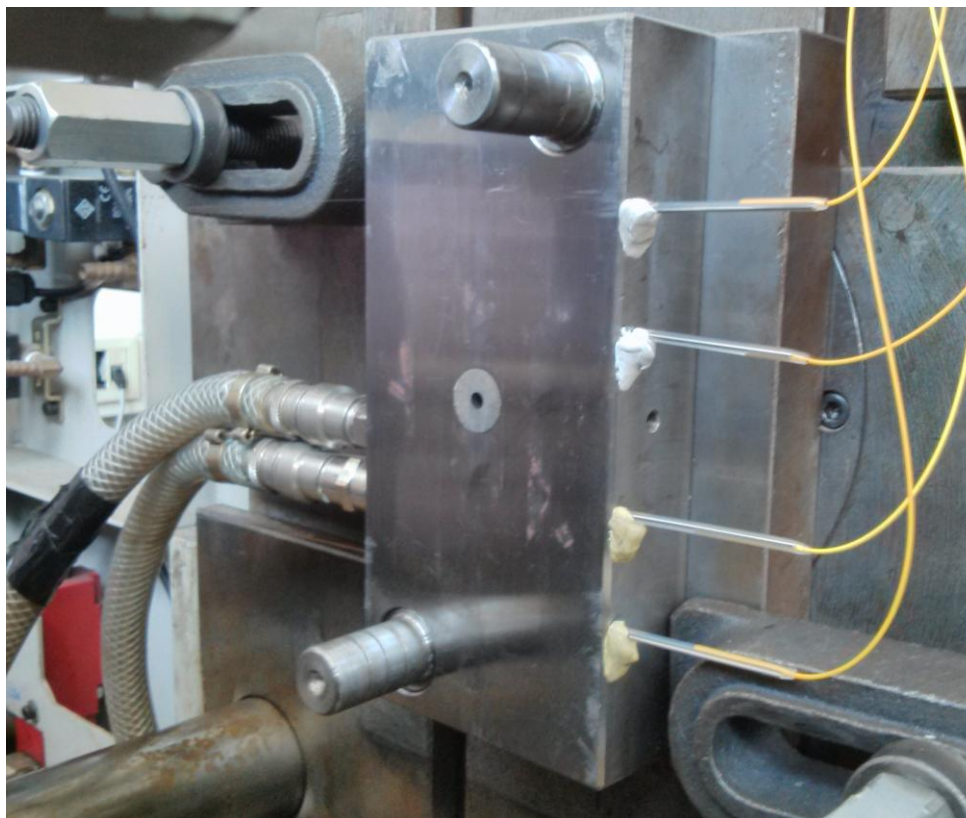
Figura 5.9 - Gráfico com variação da temperatura no sensor C2 (aquecimento entre 125 e 150 °C).

### 5.3.2 Ensaios de injeção plástica com as redes de Bragg inseridas no molde

O molde foi montado na máquina de injeção plástica (*Inautom Euro Inj Série D – D65*) existente no Departamento de Engenharia Mecânica da UA. De seguida foram colocadas as fibras dentro da placa fixa do molde como se constata na Figura 5.10. O procedimento das várias experiências com o molde montado na máquina foi o seguinte:

1. Verificar se todas as redes de Bragg são devidamente reconhecidas pelo sistema de interrogação;
2. Iniciar a gravação em contínuo dos valores das redes de Bragg com uma taxa de aquisição de 2 Hz;
3. Ligar as resistências do cilindro e do bico da máquina injetora;
4. Ligar o sistema de controlo de temperatura (SCT) e solicitar o aquecimento para os 70 °C;
5. Iniciar os ciclos automáticos de injeção quando for atingida a temperatura solicitada no bico da máquina injetora;
6. Interromper os ciclos automáticos quando a dosagem de matéria-prima (PP) colocada inicialmente acabar;
7. Alterar o SCT para os 23 °C;
8. Desligar o SCT assim que a temperatura tenha praticamente igualado a ambiente;
9. Interromper a gravação em contínuo dos valores das redes de Bragg.





**Figura 5.10 - Fibras com os sensores de Bragg colocadas no molde montado na máquina de injeção.**

Dos vários materiais disponíveis em quantidades suficientes para realizar as várias experiências de injeção (ABS, PC, PP) a opção de escolha recaiu sobre o PP pelo baixo custo relativo por unidade de massa (visto tratar-se de um termoplástico de grande consumo) e pela facilidade de processamento na máquina de injeção.

A

Tabela 5.2 apresenta a comparação das condições de processamento do PP na máquina de injeção entre o indicado na bibliografia e os valores usados nas experiências realizadas. Na mesma tabela,  $T_{inj}$  simboliza a temperatura de injeção,  $T_{molde}$  representa a temperatura da superfície do molde que está em contacto com a peça,  $P_{inj}$  expressa a pressão de injeção e  $P_{man}$  exprime a pressão de manutenção.

**Tabela 5.2 - Condições de injeção do Polipropileno (PP) [Cunha03a].**

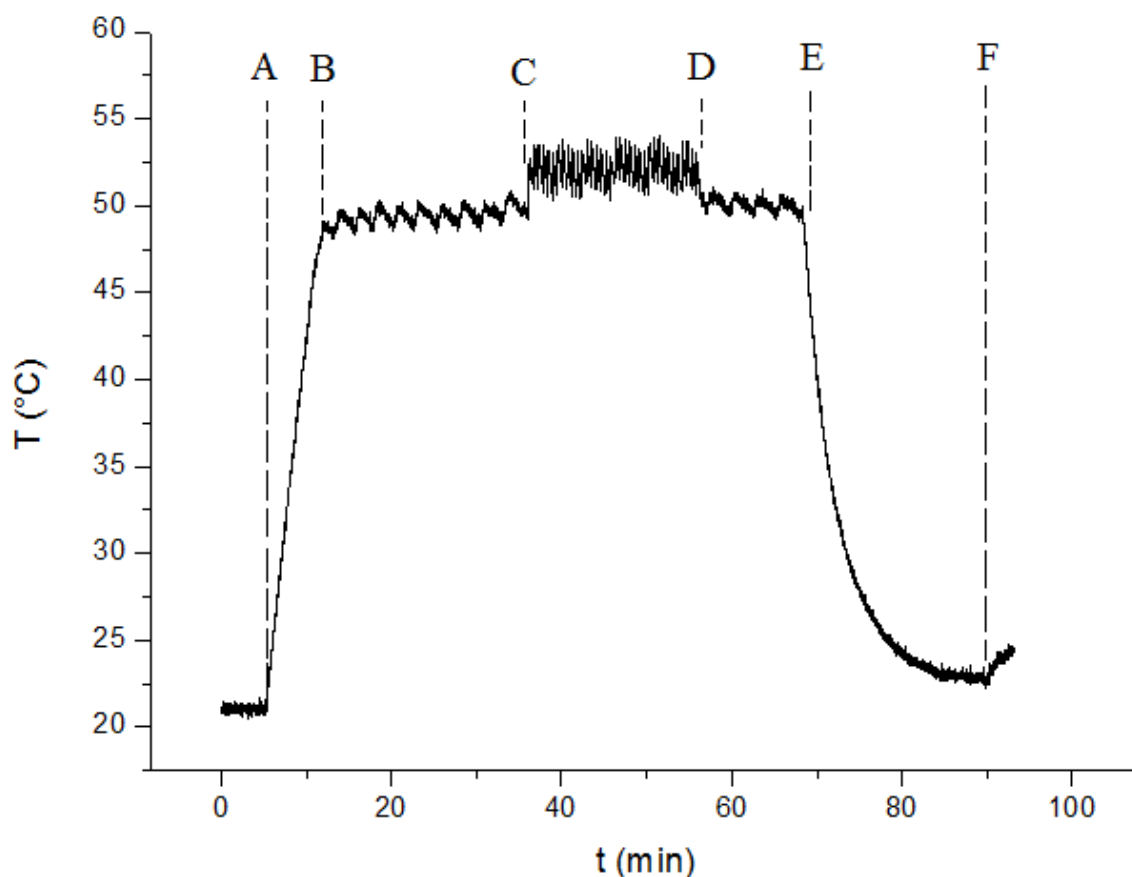
Material	$T_{inj}$ °C	$T_{molde}$ °C	$P_{inj}$ MPa	$P_{man}$ MPa	Contra Pressão MPa	Contração %
PP (valores de referência)	220 – 280	10 – 75	80 – 140	30 – 60 % $P_{inj}$	5 – 20	1 – 2,5
PP (valores usados na experiência)	230	70	8	56,25 % $P_{inj}$	4	–

A partir dos dados da Tabela 2.2, que contém as características dos termoplásticos de grande consumo, obtém-se a Tabela 5.3 onde apenas estão particularizadas as características para o Polipropileno.

**Tabela 5.3 - Propriedades físicas do Polipropileno (PP) [Cunha03a].**

Material (sigla)	Densidade	T <sub>f</sub> °C	T max. serviço °C	Módulo GPa	Resist. tração MPa	Coef. dil. linear (1/°C)x10 <sup>5</sup>	Rigidez dielétrica MV/m
PP	0.901	174	100 - 110	1.3	35	8	22

A partir dos dados recolhidos para cada rede de Bragg obtiveram-se os gráficos da variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo. Na Figura 5.11 estão representados os resultados obtidos para o sensor C2. Comportamento análogo foi obtido para os restantes sensores. O fator que melhor os distingue é mesmo o diferencial máximo do comprimento de onda, ou seja, cada sensor detetou, ao longo da experiência, temperaturas máximas diferentes, desde logo justificadas pela disposição geométrica dos sensores no molde.



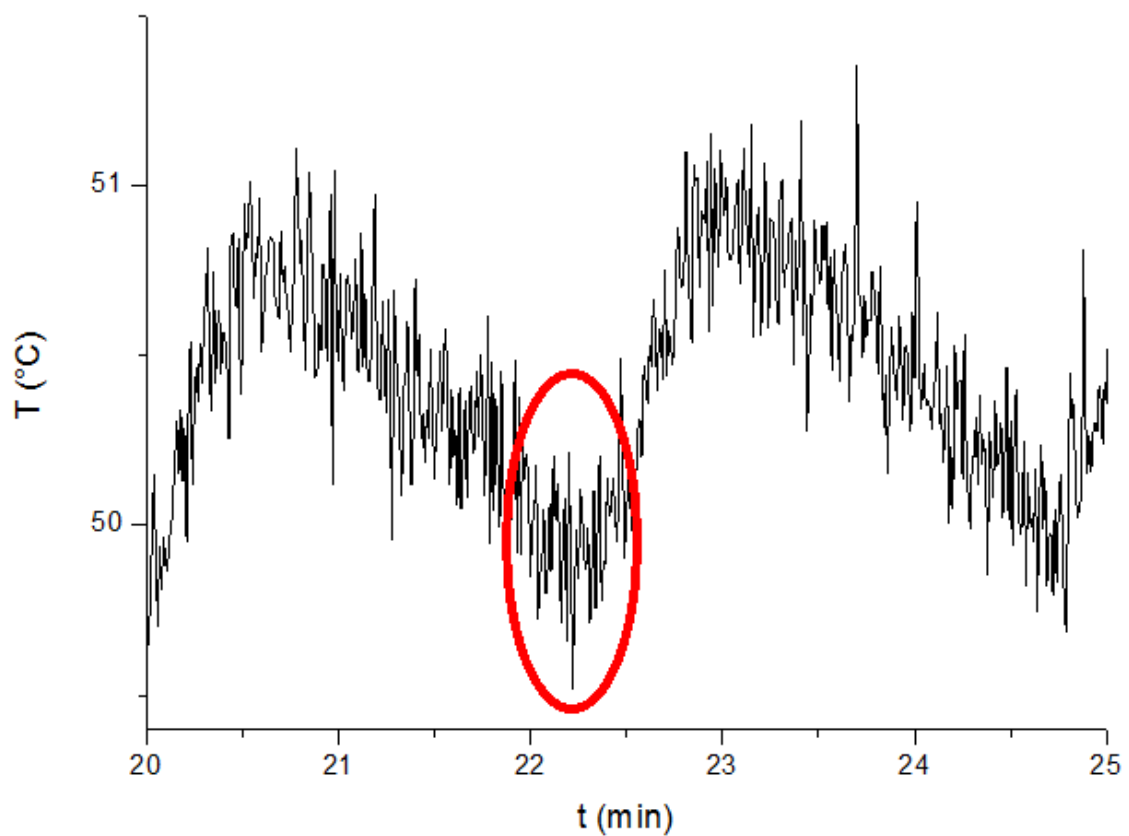
**Figura 5.11 - Gráfico da temperatura em função do tempo para o sensor C2.**



As letras de A a F sobrepostas ao gráfico indicam os momentos de mudança entre as diferentes fases da experiência de injeção. À semelhança dos 9 pontos que caracterizam o procedimento experimental do molde montado na máquina, as diferentes fases da experiência distinguidas no gráfico são as seguintes:

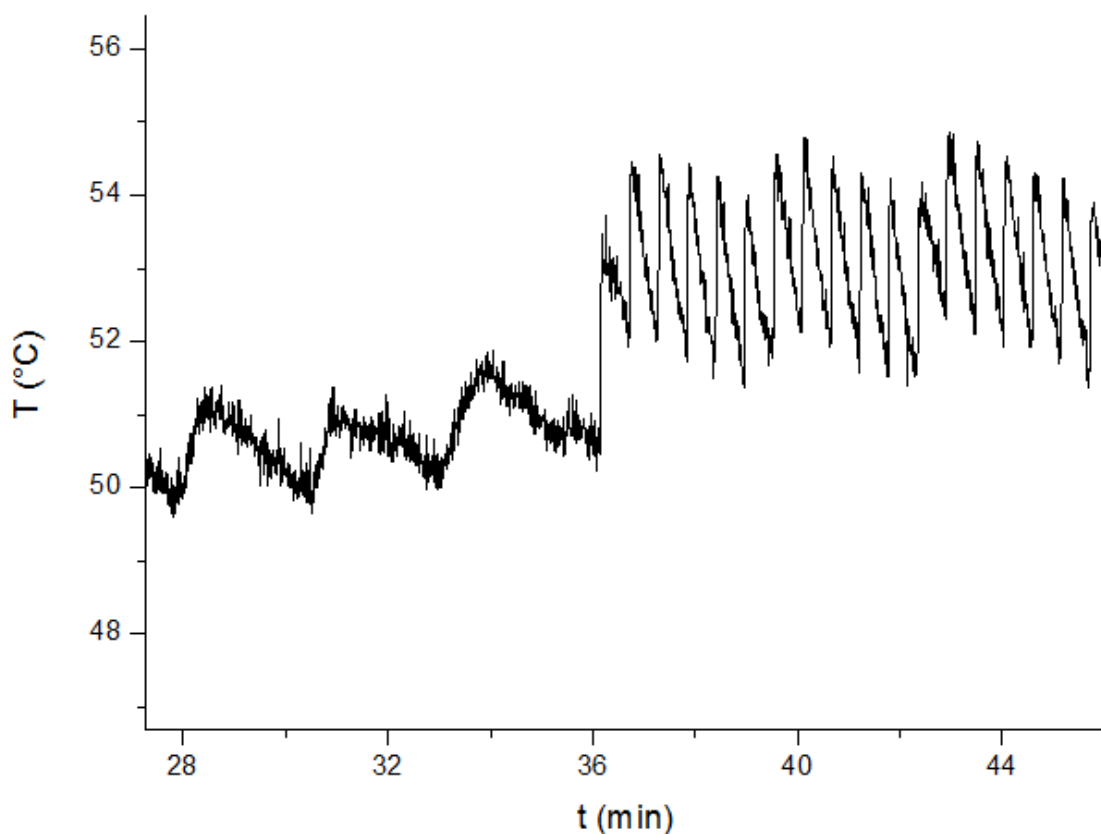
- **Antes de A:** Compasso de espera entre o início da gravação em contínuo das redes de Bragg e a ligação do SCT e respetivo ajuste para os 70 °C;
- **Entre A e B:** Aquecimento das placas do molde causado pelo SCT;
- **Entre B e C:** As placas do molde já atingiram uma temperatura praticamente constante, no entanto, o sistema que controla a temperatura da água que circula no interior do molde ativa e desativa o aquecimento (aos 68 e aos 72 °C respetivamente) e daí se explicam as oscilações do comprimento de onda do sensor. A existência desta fase é provocada pela demora do bico da injetora em atingir a temperatura solicitada (230 °C);
- **Entre C e D:** O bico da máquina de injeção já alcançou a temperatura requerida, e procede-se à injeção do material para dentro do molde. Ao fim de dois ciclos em semiautomático, procede-se à mudança para o modo automático de injeção. Como cada ciclo tem a duração média de 30 a 40 segundos, não são perceptíveis no gráfico da Figura 5.11 as variações do comprimento de onda e do tempo de cada ciclo. Durante esta fase foram completados 36 ciclos de injeção.
- **Entre D e E:** Durante esta fase o molde encontra-se aberto e procede-se à remoção do material plástico do bico da injetora. Entretanto, o SCT ainda se encontra ligado, por isso o comportamento do sensor nesta fase é muito semelhante ao da fase entre B e C.
- **Entre E e F:** A temperatura do SCT foi reduzida para 23 °C, o que forçou uma descida abrupta da temperatura do molde.
- **Depois de F:** O SCT foi desligado, o que provocou um ligeiro aumento da temperatura, que se justifica pelo facto das placas do molde ainda não estarem completamente arrefecidas até à temperatura ambiente.

Um pequeno período, da fase da experiência que se situa entre os pontos B e C, está representado de forma pormenorizada na Figura 5.12. Pelo gráfico apresentado constata-se que o sensor regista um comportamento cíclico da variação de temperatura causado pelo SCT. A área do gráfico representada pela elipse de cor vermelha indica o momento em que o aquecimento da máquina que controla o SCT está ativo. A partir deste dado, verifica-se que o tempo que decorre entre a ativação do aquecimento do SCT e a leitura no sensor de um máximo relativo é inferior a um minuto.



**Figura 5.12 - Gráfico com o pormenor da influência do SCT na temperatura registado no sensor C2.**

O comportamento registado nos sensores durante os ciclos de injeção pode ser observado na Figura 5.13. Nesta está representado em pormenor o início da fase que contempla os ciclos de injeção (aproximadamente aos 36 minutos).



**Figura 5.13 – Gráfico representativo do início dos ciclos de injeção registado no sensor C2.**

Pela diferença de tempo entre cada pico do gráfico (na zona após os 36 minutos) comprova-se que cada ciclo é identificado no gráfico, pois a duração entre 30 a 40 segundos de cada ciclo coincide com as leituras pormenorizadas dos valores do gráfico. As variações abruptas de temperatura no sentido crescente correspondem ao momento em que se dá a injeção do plástico para a cavidade do molde.

No decorrer da experiência registaram-se os valores de tempo em que se iniciou um ciclo de injeção e em que este mesmo ciclo findou. Com estes dois dados temporais fez-se a seleção a partir dos dados recolhidos de toda a experiência e obtiveram-se os valores da variação da temperatura apenas daquele ciclo de injeção para todos os sensores. Basicamente, esta seleção equivale ao pormenor da Figura 5.11 na fase dos ciclos de injeção (entre C e D) e que corresponde a um ciclo de injeção. Pela Figura 5.14 observa-se que a temperatura registada no sensor tem um aumento de aproximadamente 3 °C num período de 3 segundos que corresponde ao momento em que se dá a injeção do material polimérico. De seguida o sensor regista um decréscimo na temperatura de forma relativamente constante num período de 25 segundos, voltando aos valores iniciais de temperatura do ciclo de injeção. A descida de temperatura ocorre na fase do arrefecimento promovida pelo SCT.

As pequenas oscilações verificadas no gráfico da Figura 5.14 são causadas pelo critério de seleção do valor central dos picos por parte do *software* de leitura dos sensores FBG. O modo de funcionamento em contínuo grava apenas os valores centrais dos picos do sinal do espetro. Durante a gravação, os picos sofrem deformações mínimas que promovem a alteração no valor registado para o pico e por isso induzem pequenas oscilações observadas graficamente.

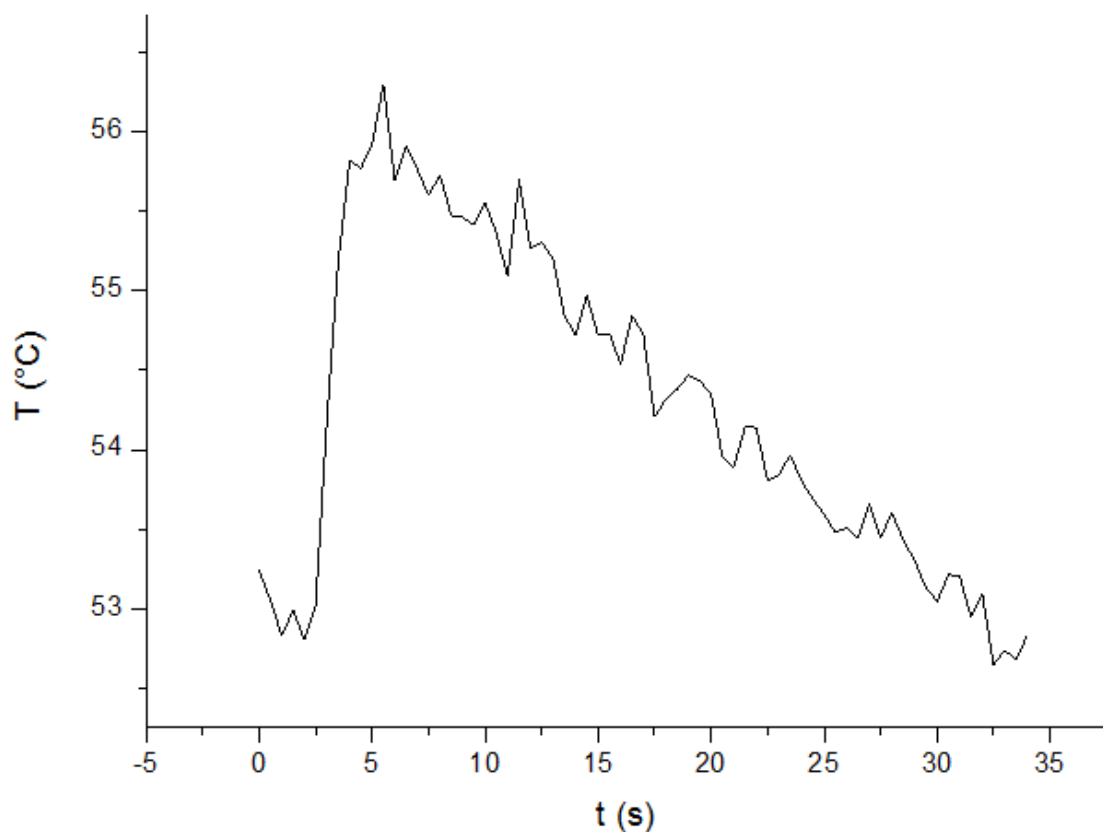


Figura 5.14 - Gráfico com a temperatura no tempo de um ciclo de injeção para o sensor C1.

O comportamento da temperatura no sensor C1 (sobreposto ao ponto de injeção de uma das peças) assemelha-se ao diagrama de temperaturas ao longo dos ciclos de moldação apresentado no *Manual do Projectista*. A Figura 5.15 contém o gráfico que mostra a evolução da temperatura no molde ao longo dos vários ciclos.

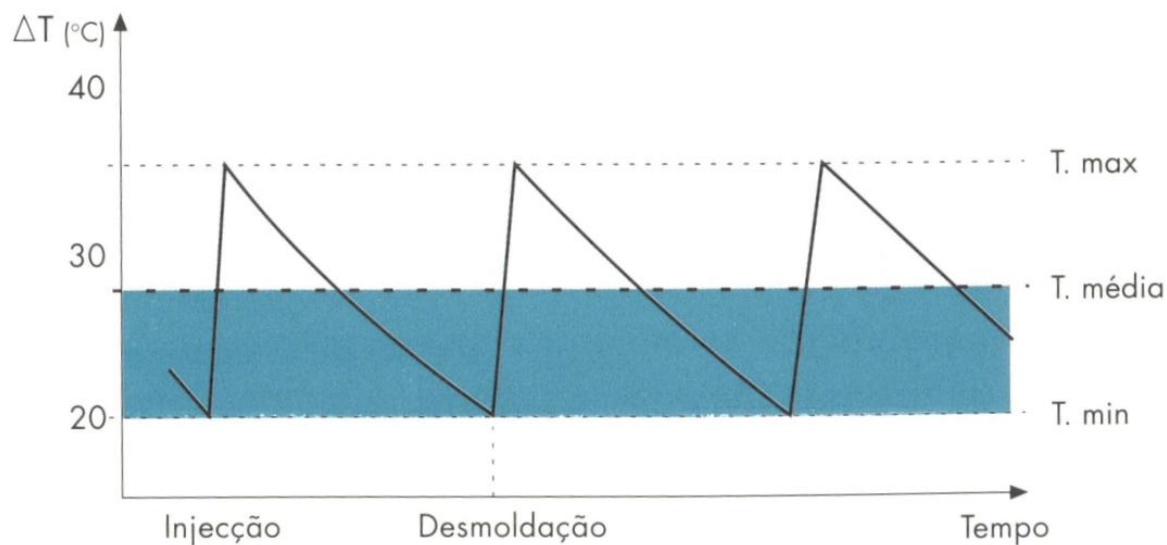
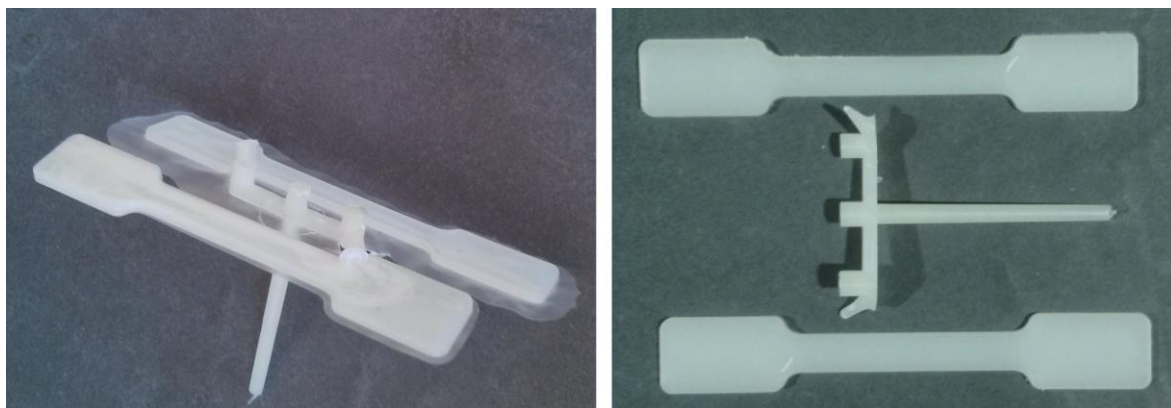


Figura 5.15 - Gráfico da evolução da temperatura média do molde ao longo do ciclo de moldação [Cunha03a].

Durante a experiência prática na máquina de injeção, as peças injetadas com PP tinham a forma de um provete. A Figura 5.16 mostra um exemplo das peças produzidas no molde aquando das experiências de injeção. Nas imagens, além das duas peças, também se encontra presente o jito.



**Figura 5.16 - Exemplo de um par de peças produzido nos ensaios com a máquina de injeção.**



# Capítulo 6 – Análise e discussão de resultados

---

## 6.1 Resultados da experiência com a placa de aquecimento

A experiência mencionada na secção 5.3.1 deste documento consistiu em colocar a placa fixa do molde, com as fibras óticas inseridas, sobre uma placa de aquecimento e realizar medições para diferentes gamas de temperatura. No entanto, os valores de temperatura recolhidos nos sensores são inferiores aos registados instantaneamente pelo sensor da própria placa de aquecimento. Este acontecimento verifica-se em todos os sensores. Um destes exemplos está apresentado na Figura 6.1, na qual é apresentado o gráfico para o sensor A1 com a variação da temperatura na gama entre 100 e 125 °C.

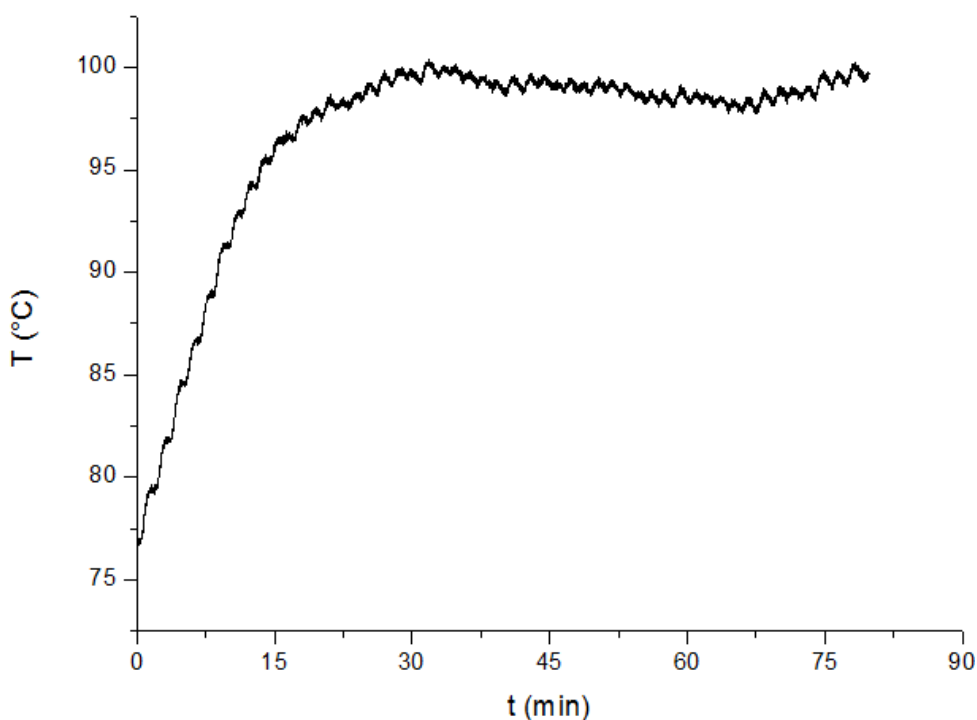
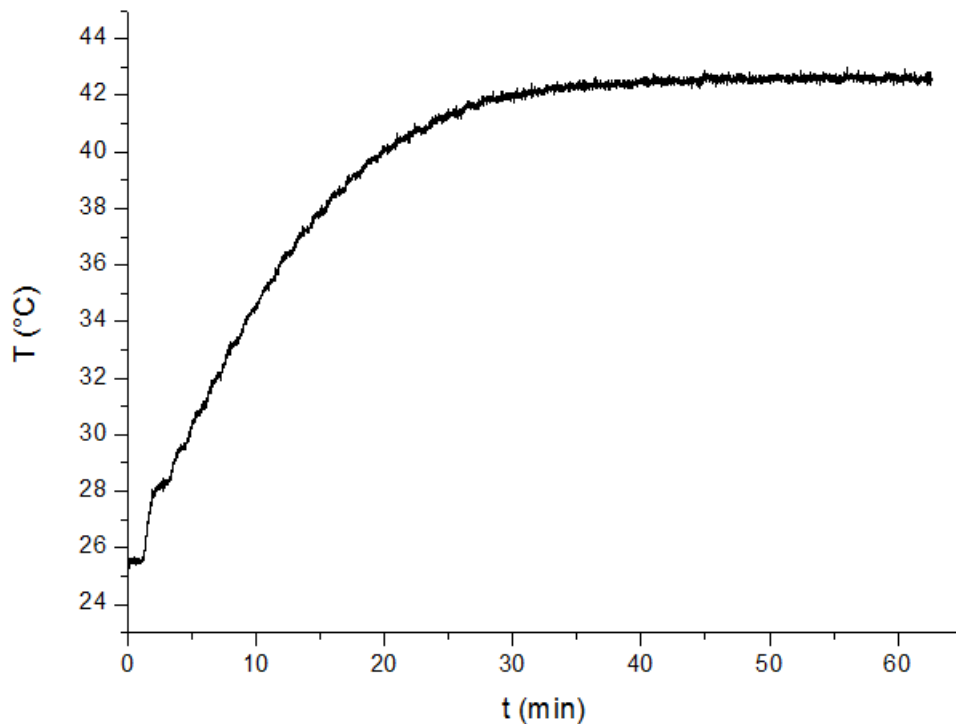


Figura 6.1 - Gráfico da variação da temperatura no sensor A1 (aquecimento entre 100 e 125 °C).

Apesar de ter sido forçado o aquecimento para valores entre 100 e 125 °C (dados obtidos pelo sensor ligado ao aparelho de aquecimento e exibidos instantaneamente no visor do próprio aparelho), os sensores de Bragg acusaram valores entre os 76 e os 100 °C. O mesmo fenómeno ocorre para outras gamas de temperatura, embora com desvios diferentes. A Figura 6.2 é um bom exemplo, pois o ensaio de aquecimento começou na temperatura ambiente e foi até aos 50 °C. Contudo, o valor da temperatura no sensor de Bragg não ultrapassou os 43 °C.



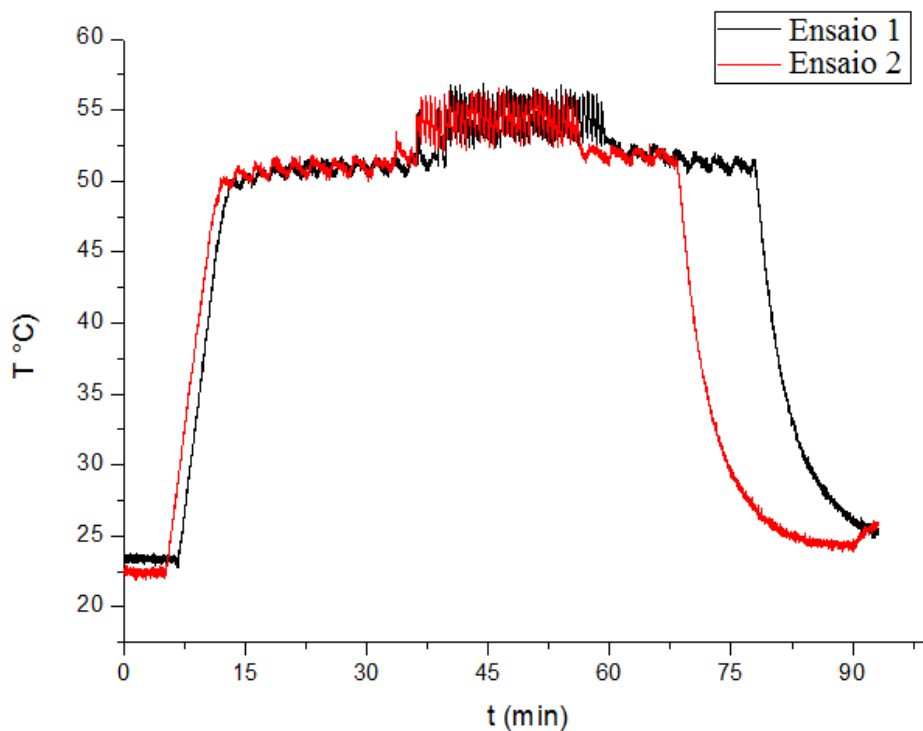
**Figura 6.2 - Gráfico da variação da temperatura no sensor A1 (aquecimento entre 25,5 e 50 °C).**

Este problema que advém da diferença de temperaturas acima do esperado entre a face moldante e o registado no sensor está escrito da secção 6.4 deste documento.

## 6.2 Resultados de diferentes experiências

Os dados que são apresentados neste capítulo foram recolhidos em ensaios de injeção realizados com o molde montado na máquina de injeção presente no DEM-UA em dois dias distintos. Na Figura 6.3 são comparados os resultados obtidos para o sensor C1.



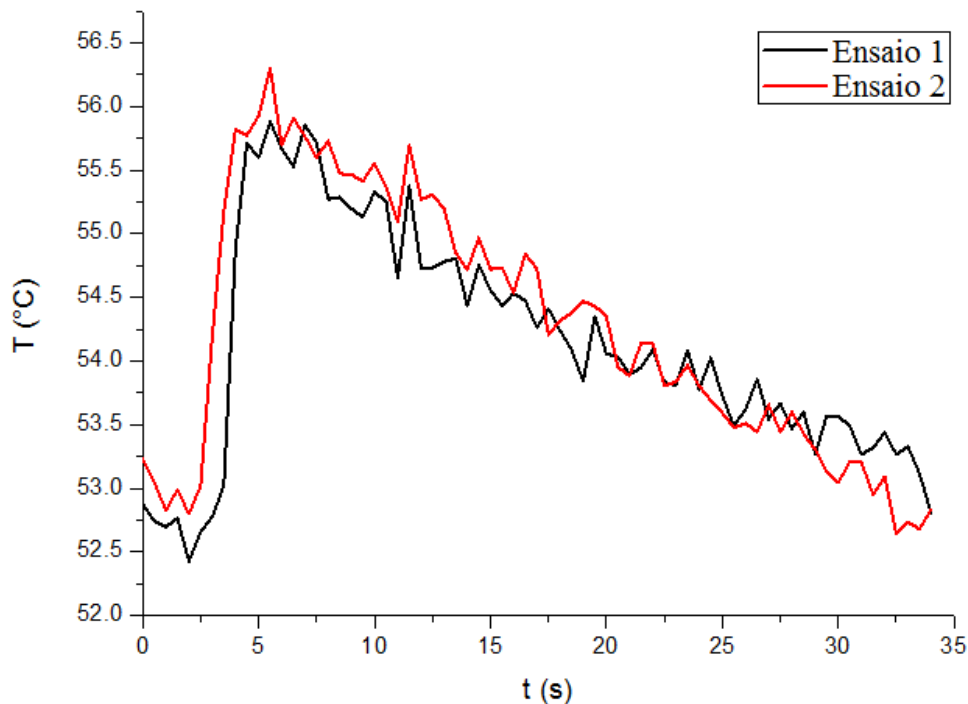


**Figura 6.3 - Gráfico comparativo dos dados dos ensaios 1 e 2 no sensor C1.**

A comparação dos resultados presentes na figura anterior confirma a semelhança no comportamento da temperatura, visível nas variações, crescente e decrescente, e também nos valores absolutos alcançados na fase de injeção. Nas duas experiências, o número de fases distintas é igual e corresponde ao que foi mencionado na Figura 5.11 e no texto subjacente. A grande diferença entre os dois ensaios reside no tempo. No ensaio 2, o SCT foi ativado mais cedo, e por isso a subida de temperatura acontece antes, no entanto, apresentam ambas um declive idêntico. Na parte final, no ensaio 2 o SCT foi regulado para a temperatura ambiente também mais cedo.

Relativamente aos valores associados ao tempo de um ciclo, durante ambas as experiências foram recolhidos esses registos, num ciclo aleatório, de acordo com o tempo observado no monitor da máquina de injeção. A Figura 6.4 apresenta a comparação dos ensaios 1 e 2 relativamente aos valores de temperatura medidos no sensor C1.

A partir da seguinte figura, fica também comprovada a semelhança entre as duas experiências no caso particular do tempo de um ciclo de moldação. De igual forma, como tinha sucedido no caso anterior, o comportamento da temperatura é similar nas duas experiências, divergindo ligeiramente nos valores absolutos alcançados, no entanto, esta diferença é inferior a 1 °C. Outro fator que se repete é a diferença no tempo, perceptível principalmente no início do gráfico. Neste caso, o tempo que separa as duas curvas é de aproximadamente 1 segundo.



**Figura 6.4 - Gráfico comparativo do tempo de um ciclo dos ensaios 1 e 2 no sensor C1.**

Com os dados obtidos, procedeu-se à seleção da temperatura máxima em cada sensor ao longo de toda a experiência. Os valores máximos de temperatura estão apresentados na Tabela 6.1. Como é sabido, as fibras B e C possuem apenas 2 sensores, por isso os campos correspondentes aos sensores 3 e 4 encontram-se vazios. Antes do ensaio 1 houve um problema com a fibra B, por isso ela não foi utilizada e os respetivos registos não estão preenchidos. Em todos os sensores comparáveis, a temperatura máxima no ensaio 1 foi superior à do ensaio 2, embora a diferença se tenha situado entre os 0,3 e os 0,7 °C.

**Tabela 6.1 - Valores máximos da temperatura em cada sensor nos ensaios 1 e 2 (valores em °C).**

	Fibra A		Fibra B		Fibra C		Fibra D	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
Sensor 1	50,9	50,4	—	56,6	56,9	56,6	52,0	51,5
Sensor 2	52,3	52,0	—	55,6	55,7	55,1	52,1	51,6
Sensor 3	51,8	51,3	—	—	—	—	51,6	51,2
Sensor 4	53,9	53,6	—	—	—	—	53,8	53,1

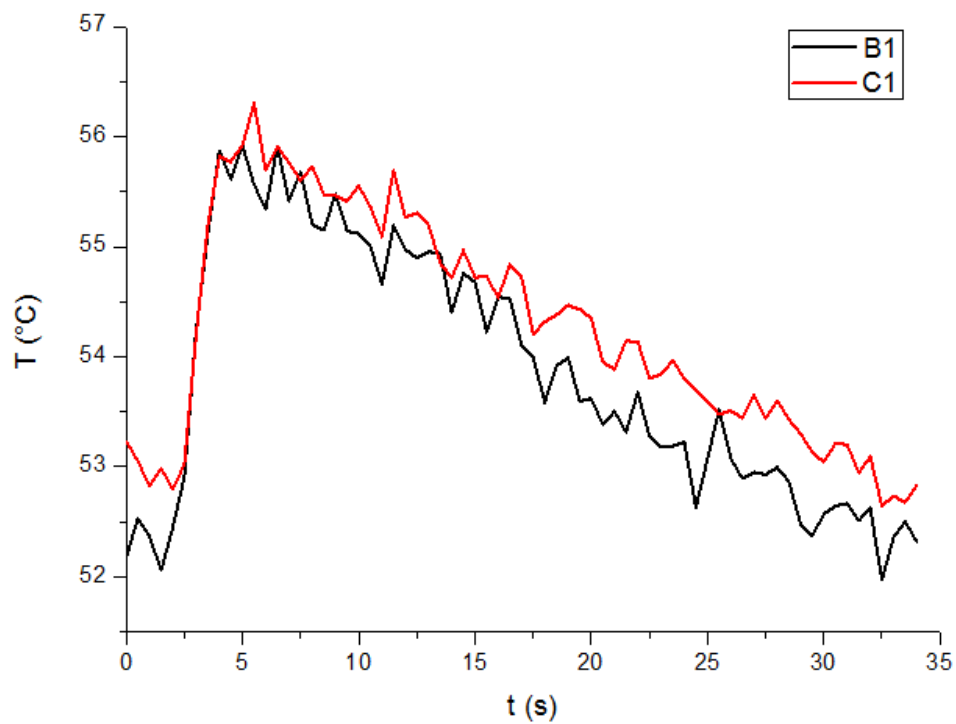
Os resultados dos ensaios efetuados em diferentes ocasiões foram muito semelhantes entre si, o que fundamenta o conceito deste comportamento térmico registado nos sensores ser típico, ou seja, com as condições impostas na experiência e com esta localização dos sensores, os valores possíveis de obter serão muito próximos destes.

Neste subcapítulo apenas foram apresentados os resultados destas duas experiências, pois foram realizadas com os mesmos sensores FBG. No entanto, estes ensaios foram antecidos por duas outras experiências preliminares com diferentes sensores. Algumas das redes utilizadas nesses primeiros ensaios ficaram danificadas após a experiência do comportamento térmico do molde, documentada na secção 5.3.1 deste documento. Este motivo levou a uma adaptação das fibras para que fosse possível a reutilização das mesmas, o que em alguns casos originou a passagem da fusão para o lado oposto, invertendo a ordem dos sensores ao longo da fibra. Com algumas fibras adaptadas e outras inoperantes, a distribuição dos sensores ao longo do molde ficou muito desajustada. Inclusive nenhum sensor estava sobreposto a um dos pontos de injeção. Os resultados dessas experiências preliminares foram importantes para conhecer o comportamento térmico do molde nos ciclos de injeção e para saber aproximadamente o tempo total de uma experiência. No entanto, os resultados obtidos não eram suficientes para atingir os objetivos propostos nesta dissertação, pelo que decidiu-se preparar mais fibras com novas redes de Bragg, caracterizá-las termicamente e realizar mais experiências de injeção, de modo a terem-se mais garantias na localização exata dos sensores ao longo do molde e sobretudo sobre os pontos de injeção nas peças.

## **6.3 Resultados comparativos de uma experiência**

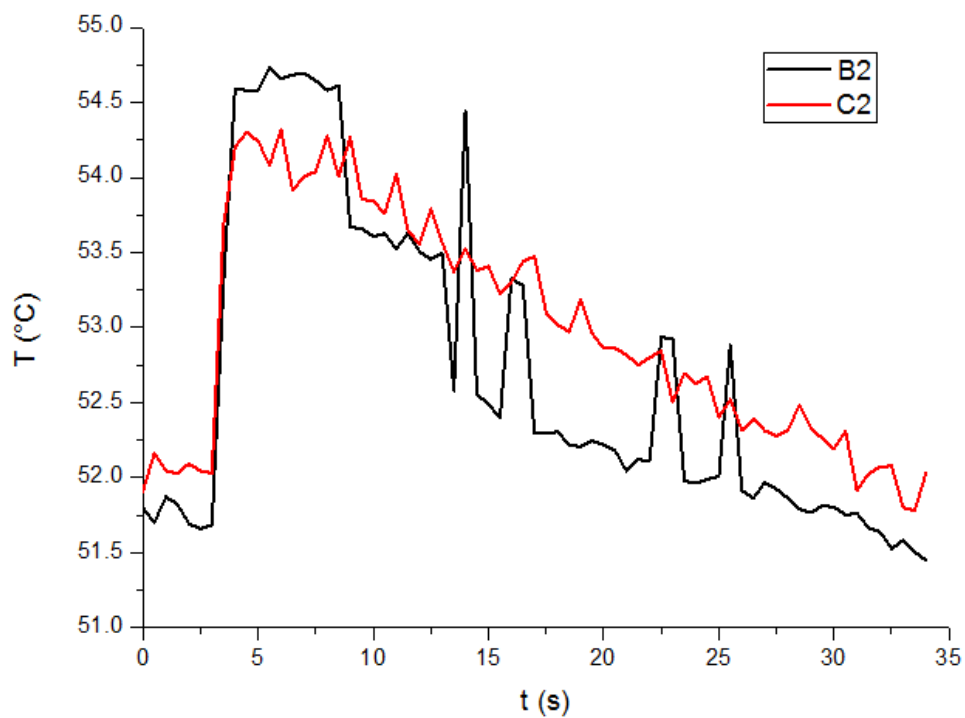
À semelhança dos sensores sobrepostos aos pontos de injeção de cada peça, os outros sensores gravados nas fibras também estão dispostos aos pares, um em cada peça, de forma equidistante ao centro do molde. A intenção inicial de os colocar desta forma ficou concretizada com as distâncias reais que podem ser consultadas nas Figuras 5.2 e 5.3.

A comparação mais pertinente corresponde aos dois sensores que estão localizados sobre os pontos de injeção. A Figura 6.5 apresenta o gráfico comparativo entre estes dois sensores (B1 e C1). Pela figura apercebem-se facilmente as semelhanças entre os dois locais, quer no comportamento térmico da subida abrupta de temperatura e a seguinte descida gradual, quer nos valores absolutos de temperatura alcançados. Neste caso, os níveis de tempo estiveram praticamente alinhados, facto que é perceptível na subida de temperatura, com as duas curvas sobrepostas.



**Figura 6.5 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores B1 e C1.**

De seguida, os locais com temperaturas próximas dos pontos de injeção são os sensores B2 e C2 que ficam na secção estreita da peça. A Figura 6.6 apresenta o gráfico com o comportamento destes dois sensores.

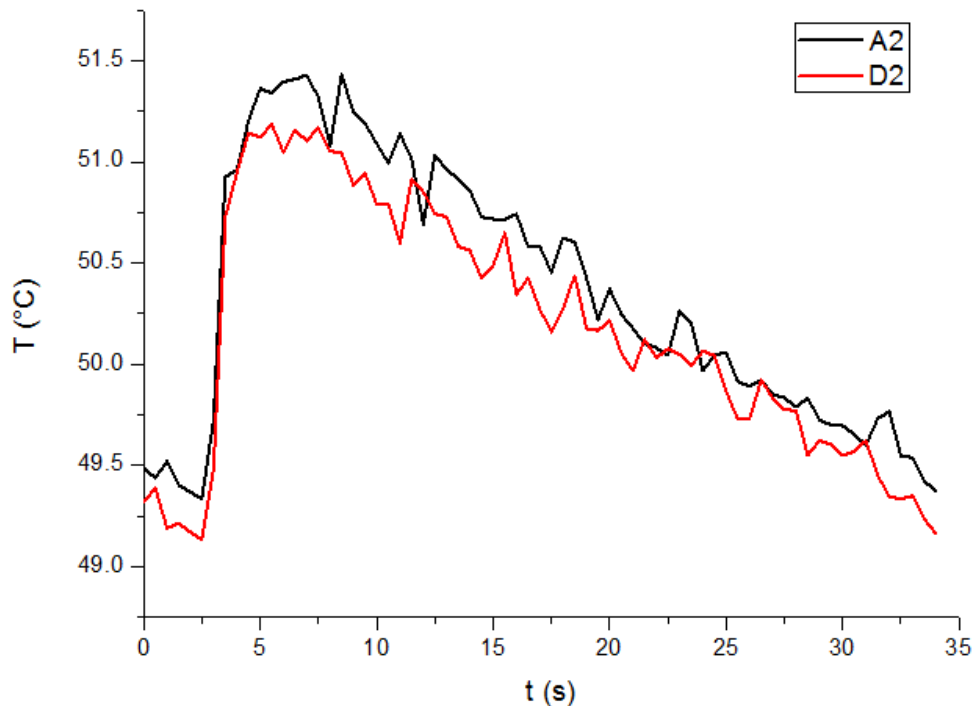


**Figura 6.6 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores B2 e C2.**

Pela figura anterior constata-se algumas semelhanças entre os dois sensores, no entanto, o comportamento do sensor B2 na fase em que a temperatura decresce apresenta algumas irregularidades. Estes desvios no sinal do sensor repetem-se nos outros ciclos, portanto a causa deste problema reside na identificação da rede de Bragg pelo *software* associado ao equipamento de interrogação.

Existem alguns fatores que influenciam a aquisição dos dados pelo sistema de interrogação, dos quais se destacam dois: os parâmetros de seleção automática do pico central que caracteriza a rede de Bragg e a existência de ruído no sinal provocada pela existência de múltiplas reflexões na ponta da fibra ótica, causada pela transição abrupta do índice de refração. Em relação ao último ponto, a solução deste problema passaria pela aplicação de um gel adaptador de índice de refração na extremidade da fibra ótica. Contudo, devido ao problema da fibra B que impossibilitou a sua utilização no ensaio 1, a fibra sofreu uma alteração que provocou a troca da posição dos sensores e a mudança da fusão para a outra extremidade. Esta alteração encurtou a fibra B e a sua extremidade passou a estar dentro do molde, fora do alcance para uma eventual aplicação do gel.

Excluindo os sensores que estão sobre os pontos de injeção, os sensores mais próximos são o A2 e o D2. A Figura 6.7 ilustra a comparação entre estes dois sensores.



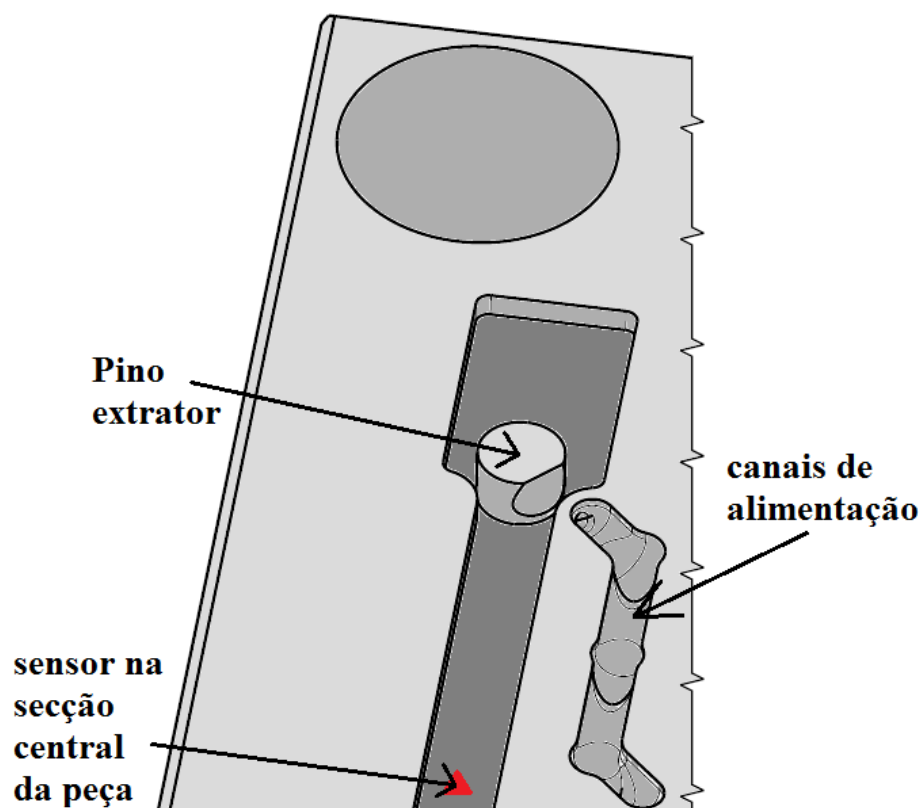
**Figura 6.7 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A2 e D2.**

Na figura anterior observam-se muitas das semelhanças já mencionadas, como são os casos da sobreposição das curvas na subida de temperatura, os valores absolutos alcançados e o comportamento térmico similar. Embora as curvas tenham variações de temperatura praticamente iguais, a curva associada ao sensor A2 apresenta valores absolutos ligeiramente superiores (inferiores a meio grau celsius).

Um facto intrigante prende-se com os últimos dois gráficos e também com os valores da Tabela 6.1. Na comparação entre os sensores B2 e C2, as temperaturas máximas atingidas alcançaram valores próximos dos 54 – 55 °C, enquanto os sensores A2 e D2 atingiram valores máximos perto dos 51 – 52 °C. O fator que torna esta diferença nas temperaturas máximas

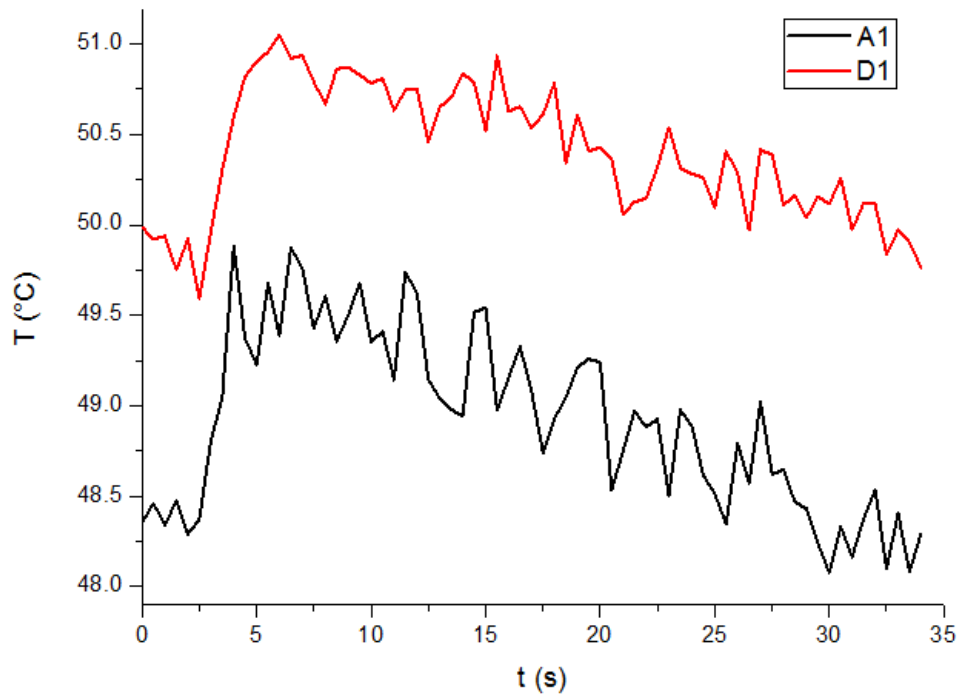
intrigante é que os sensores A2 e D2 estão mais próximos do ponto de injeção que os sensores B2 e C2 (30,2 e 49,15 mm respetivamente).

A causa que aparenta ser mais plausível é a orientação dos pinos extratores que força a passagem do material fundido para o centro de cada peça e por isso os sensores B2 e C2 detetam valores de temperatura superiores. A Figura 6.8 mostra em detalhe o pino extrator. Ele encontra-se numa posição avançada para ilustrar o detalhe que ele possui que impele o material fundido a avançar no sentido da extremidade oposta, ou seja, no sentido do sensor que está na secção central da peça. Contrariamente à figura, no momento em que se dá a injeção, o pino extrator encontra-se recuado e a face do topo é complanar com a cavidade da peça. O ataque nestas peças é classificado como injeção num extrator pois recorre a este componente do molde para preencher a cavidade moldante. O material fundido percorre os canais de alimentação e na zona do ataque submerge e através da secção côncava, presente na face lateral do injetor, emerge até à cavidade moldante, preenchendo-a.



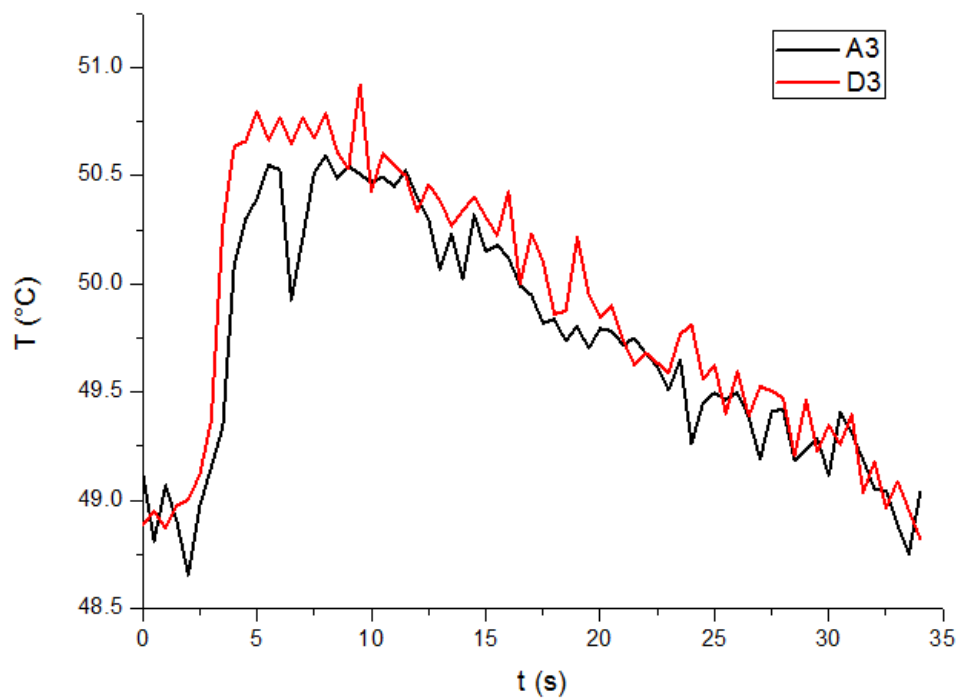
**Figura 6.8 - Representação em perspectiva do pormenor do pino extrator com a cavidade da peça.**

Dos vários sensores dispostos ao longo do molde, o par conjugado que revelou mais divergências foi o dos sensores A1 e D1. A Figura 6.9 apresenta a comparação entre estes dois sensores. Pelo gráfico presente na figura constata-se a semelhança que se tem verificado em todos os pares de sensores, que é o comportamento térmico similar com a subida abrupta da temperatura com a sequente descida mais gradual. No entanto os valores de temperatura alcançados divergem e o sensor D1 tende a registar, durante todo o tempo de ciclo, valores de temperatura entre 1 e 1,5 °C acima dos valores recolhidos a partir do sensor A1. Outro fator que se realça no gráfico é a variação no sinal, principalmente no sensor A1 a partir dos 5 segundos, que torna pouco perceptível o verdadeiro comportamento da temperatura.



**Figura 6.9 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A1 e D1.**

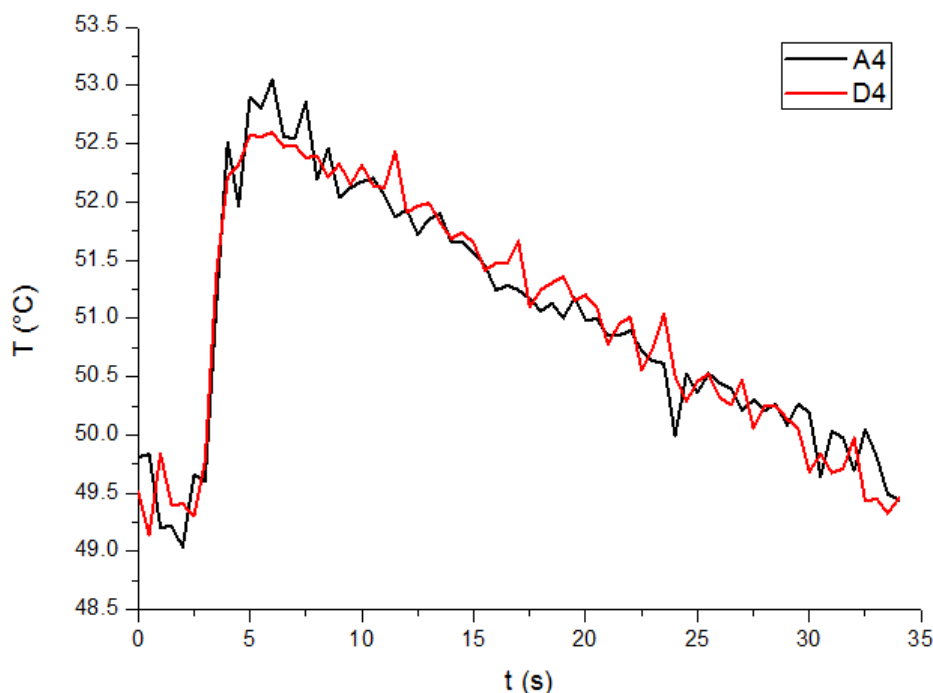
Em pontos muito semelhantes aos dos sensores representados na figura anterior estão os sensores A3 e D3. A Figura 6.10 apresenta o gráfico com a comparação entre estes dois sensores.



**Figura 6.10 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A3 e D3.**

A partir da figura anterior realçam-se as semelhanças no comportamento térmico ao longo do tempo de ciclo e nos valores de temperatura alcançados. No entanto, existem algumas divergências como é o caso do sensor A3 que num instante deteta erradamente um valor de temperatura 0,5 graus celsius abaixo do suposto.

De todos os pares de sensores conjugados, o que apresenta maiores semelhanças é composto pelos sensores A4 e D4. A Figura 6.11 ilustra o gráfico que compara estes dois sensores no tempo de um ciclo de moldação. Pelo gráfico comprova-se que a semelhança nos valores alcançados por estes dois sensores é grande em todo o tempo de ciclo, quer nas variações de temperatura, quer no tempo em que elas ocorrem. Contudo, ainda existem algumas divergências ao longo do gráfico, causadas por pequenas variações no sinal recolhido pelo equipamento de interrogação das fibras óticas.

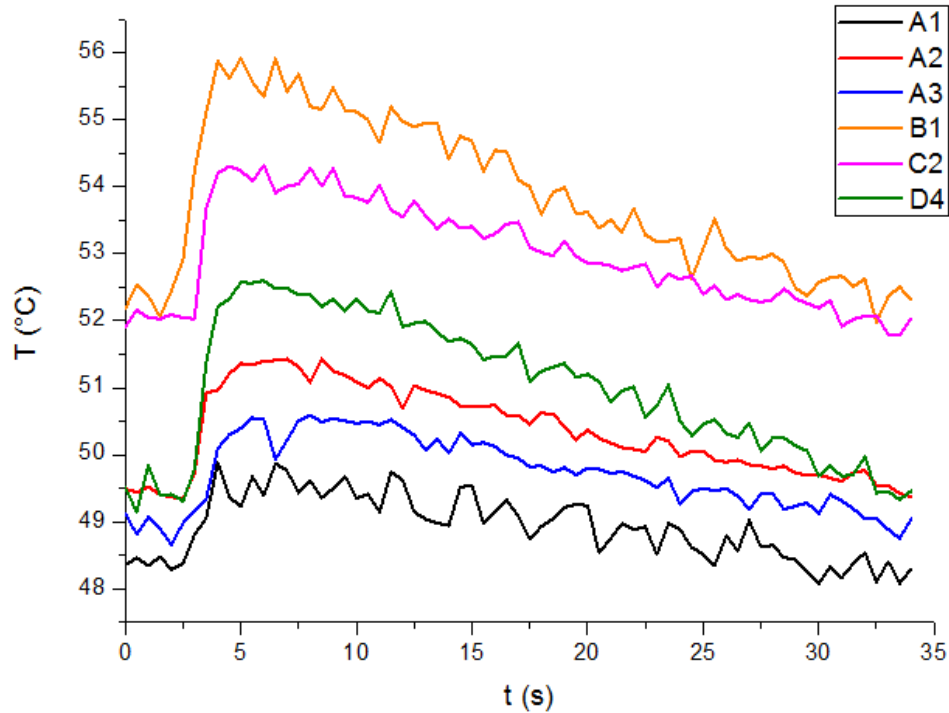


**Figura 6.11 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores A4 e D4.**

Para uma análise mais completa aos dados do ensaio 2, além dos gráficos comparativos com os pares conjugados de sensores, também são apresentados de seguida os gráficos com o tempo de um ciclo de moldação, mas com os sensores agrupados por peça. Ou seja, os sensores A1, A2, A3, B1, C2 e D4 estão sobre a peça 1, e os sensores A4, B2, C1, D3, D2 e D1 estão sobre a peça 2. A Figura 6.12 apresenta os vários resultados dos sensores que estão associados à peça 1. Na seguinte figura destaca-se claramente o sensor sobreposto ao ponto de injeção por apresentar os maiores valores de temperatura alcançados. Um fator interessante é a diferença de tempo em que cada sensor atinge a temperatura máxima. Neste caso particular o sensor B1 atinge o valor máximo da temperatura aos 4 segundos enquanto o sensor A2 atinge-o apenas aos 7 segundos.

A temperatura inicial do ciclo de moldação nos sensores B1 e C2 (localizados sobre a secção central da peça) está perto dos 52 °C enquanto a temperatura inicial nos outros sensores encontra-se entre os 48,5 e os 49,5 °C. Outro dado pertinente reside na diferença de temperaturas crescente, em que o sensor B1 apresenta um valor muito superior ao sensor A1 (3,8 e 1,6 °C respetivamente).





**Figura 6.12 – Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores da peça 1.**

No caso da peça 2, cujos sensores estão representados na Figura 6.13, o comportamento térmico é bastante semelhante ao da peça 1. As cores nas duas imagens estão atribuídas por pares conjugados de sensores, como por exemplo, nas duas imagens o sensor sobreposto ao ponto de injeção tem associada a cor laranja. No caso da peça 2 também se evidencia o sensor sobreposto ao ponto de injeção por alcançar valores de temperatura superiores.

Outros fatores mencionados para a peça 1 também se verificam na peça 2, como são os casos das diferenças de tempos em que os sensores C1 e D3 atingem a temperatura máxima (5 e 9 segundos respetivamente), das diferenças de temperaturas no início do ciclo dos sensores B2 e C1 para os restantes sensores e das diferenças de temperatura alcançadas pelos sensores C1 e D3 (3,4 e 2 °C respetivamente).

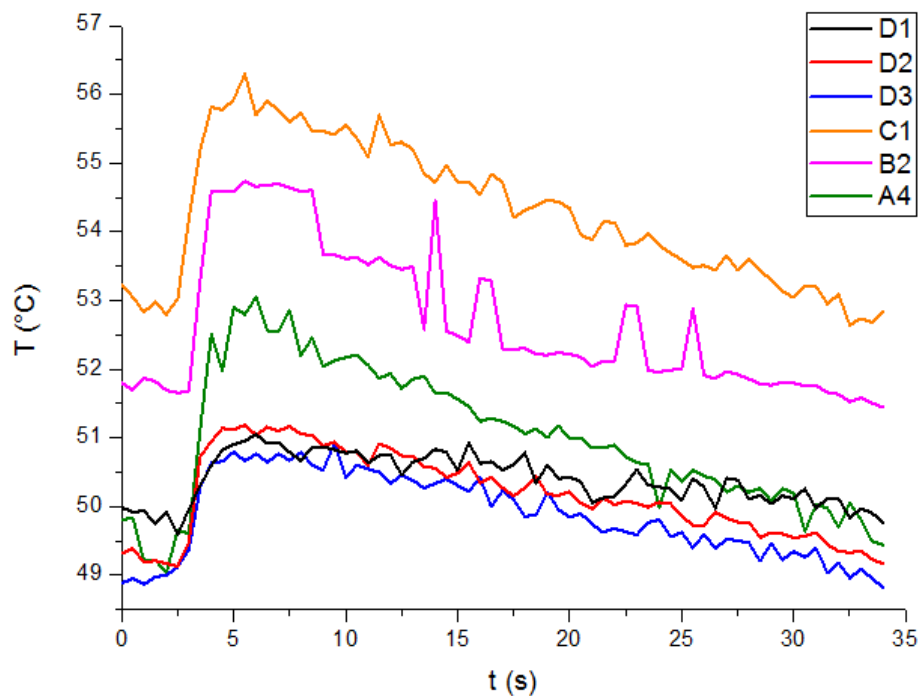


Figura 6.13 - Comparação de um ciclo de moldação obtido para os sensores da peça 2.

A partir dos dados dos sensores de temperatura para o tempo de um ciclo de moldação foi gerada a Tabela 6.2. Os valores máximos de temperatura nestes registos estão a negrito e ocorreram entre os 4 e os 6 segundos de tempo de ciclo.

Tabela 6.2 - Temperaturas dos sensores ao longo do tempo de um ciclo (valores em °C).

tempo (s)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4
0	48,4	49,5	49,1	49,8	52,2	51,8	53,2	51,9	50,0	49,3	48,9	49,5
1	48,3	49,5	49,1	49,2	52,4	51,9	52,8	52,0	49,9	49,2	48,9	49,8
2	48,3	49,4	48,7	49,0	52,4	51,7	52,8	52,1	49,9	49,2	49,0	49,4
3	48,8	49,7	49,2	49,6	54,2	51,7	54,2	52,0	50,0	49,5	49,4	49,8
4	<b>49,9</b>	51,0	50,1	52,5	<b>55,9</b>	54,6	55,8	54,2	50,6	50,9	50,6	52,2
5	49,2	<b>51,4</b>	50,4	52,9	55,9	54,6	<b>55,9</b>	54,2	50,9	<b>51,1</b>	<b>50,8</b>	<b>52,6</b>
6	49,4	51,4	<b>50,5</b>	<b>53,1</b>	55,3	<b>54,7</b>	55,7	<b>54,3</b>	<b>51,0</b>	51,0	50,8	52,6
7	49,8	51,4	50,2	52,5	55,4	54,7	55,8	54,0	50,9	51,1	50,8	52,5
10	49,4	51,1	50,5	52,2	55,1	53,6	55,6	53,8	50,8	50,8	50,4	52,3
15	49,5	50,7	50,2	51,6	54,7	52,5	54,7	53,4	50,5	50,5	50,3	51,6
20	49,2	50,4	49,8	51,0	53,6	52,2	54,4	52,9	50,4	50,2	49,8	51,2
25	48,5	50,1	49,5	50,4	53,1	52,0	53,6	52,4	50,1	49,9	49,6	50,5
30	48,1	49,7	49,1	50,2	52,6	51,8	53,0	52,2	50,1	49,5	49,3	49,7
34	48,3	49,4	49,0	49,4	52,3	51,4	52,8	52,0	49,8	49,2	48,8	49,5

A partir dos dados recolhidos na tabela anterior, seleccionaram-se determinados instantes de tempo e foram associados os valores de temperatura à posição do respetivo sensor no molde, como se verifica na Figura 6.14.

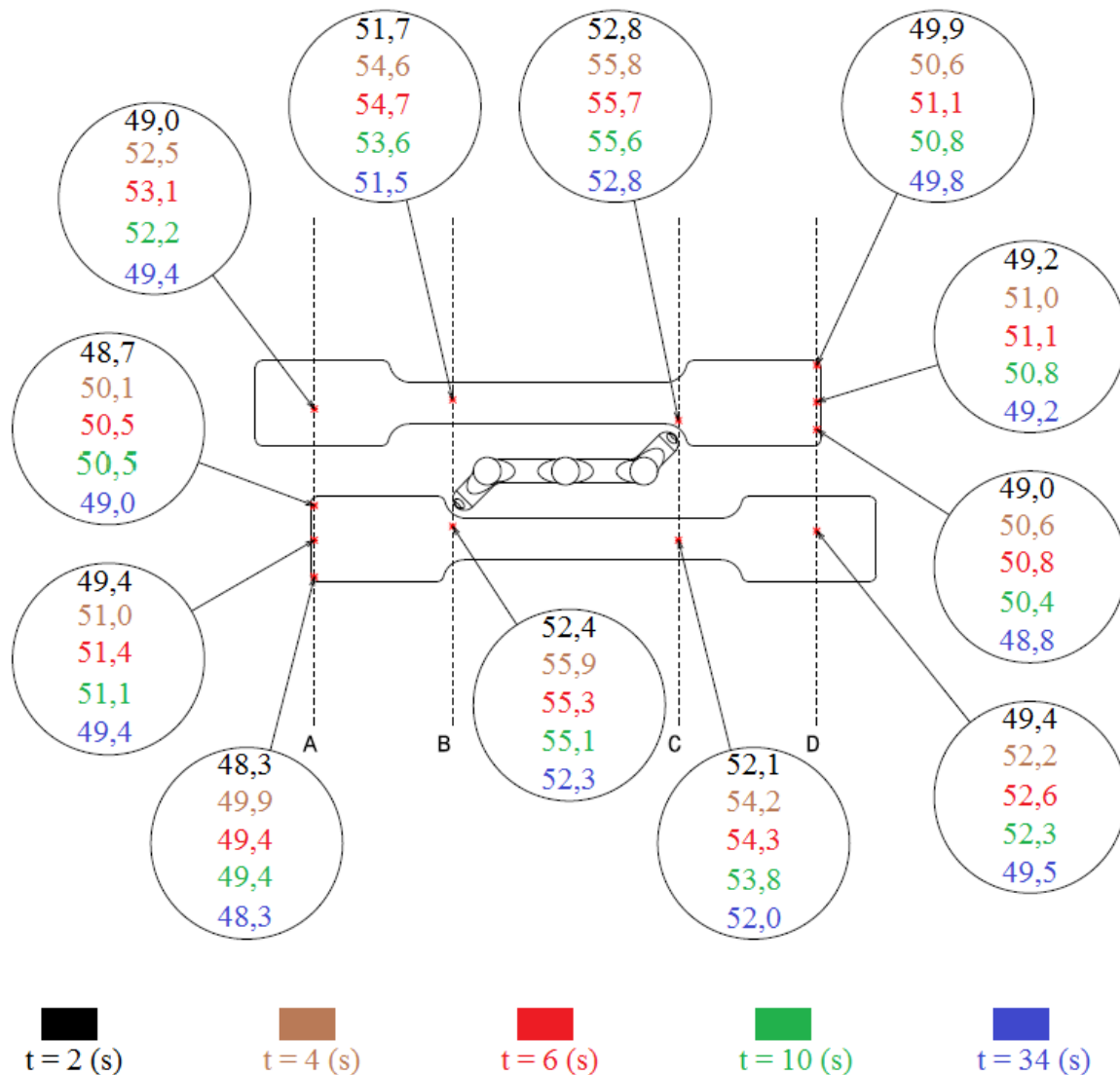


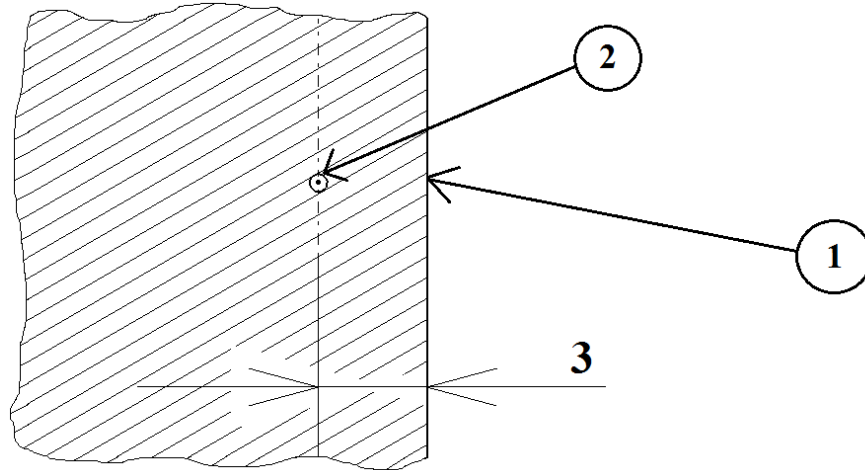
Figura 6.14 - Temperaturas em cada sensor nos instantes de tempo ao longo de um ciclo de moldação (valores em °C).

## 6.4 Análise à transferência de calor

A temperatura média alcançada pelos sensores da secção central (B1, B2, C2 e C1) da peça no final do ciclo de moldação foi 52,2 °C. Pela simulação numérica descrita na secção 4.3 deste documento, a temperatura da secção central da peça no momento que antecede a extração é 77 °C. A Figura 6.15 apresenta um esquema, no qual aparece um corte local na placa fixa transversal aos furos que contêm as fibras óticas. O ponto 1 corresponde à superfície moldante em contacto com a peça, o ponto 2 corresponde ao furo que contém a fibra ótica (de diâmetro 0,5 mm) e a distância entre o eixo do furo e a superfície moldante é 3 mm.

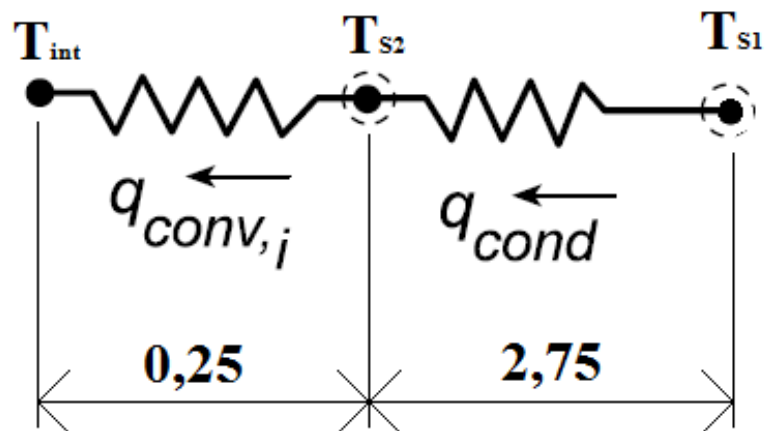
Nesta análise da transferência de calor não foram tidas em conta as trocas de calor por radiação, foram apenas considerados processos de condução unidirecionais em regime estacionário, não foram avaliadas as trocas de calor com a vizinhança além dos furos onde estão alojadas as fibras.

O calor flui naturalmente pela diferença de temperaturas da superfície moldante para a placa de aperto da cavidade, para o SCT e também para os furos onde se encontram as fibras óticas com os sensores gravados.



**Figura 6.15 - Esquema representativo do corte da placa da cavidade com o fluxo de calor do ponto 1 para o ponto 2 (distância em mm).**

No fluxo particular da superfície moldante até aos furos com os sensores FBG, o calor atravessa duas resistências térmicas. Uma corresponde à resistência à condução de calor pela placa de aço da cavidade, e outra à convecção livre de calor na direção radial de um cilindro com 0,5 mm de diâmetro. A Figura 6.16 ilustra um esquema representativo do fluxo de calor, em que  $T_{int}$  corresponde à temperatura detetada no sensor,  $T_{s2}$  indica a temperatura na superfície cilíndrica do furo passante onde a fibra está alojada,  $T_{s1}$  representa a temperatura da cavidade moldante,  $q_{conv,i}$  traduz o fluxo de calor por convecção no interior do furo e  $q_{cond}$  equivale ao fluxo de calor por condução na placa da cavidade. Na figura, as linhas com picos representam as resistências térmicas.



**Figura 6.16 - Esquema do fluxo de calor (distâncias em mm).**

Para este estudo ser completo, era necessário conhecer a  $T_{s2}$ . Mesmo ignorando este facto, para uma distância de 3mm em aço uma diferença de temperaturas superior a 20 °C é um valor muito acima do expectável. A perda de calor no bloco de aço para estas distâncias curtas é praticamente desprezável, e a resistência térmica na fase da convecção livre, com o diâmetro de 0,5 mm, não aparenta ser suficiente para promover uma diferença de temperaturas tão grande.



# Capítulo 7 – Conclusões e trabalho futuro

---

## 7.1 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho era analisar o comportamento térmico das ferramentas moldantes com os ciclos de produção de peças poliméricas, de forma a melhor compreender os fenómenos de transferência de calor entre o polímero fundido, a ferramenta moldante e os sistemas de controlo da temperatura nela implantados. Com os dados recolhidos, fez-se um estudo relativo a um ciclo de moldação, analisando os valores da temperatura ao longo do tempo para cada sensor. Deste modo, além de comparar as temperaturas em diferentes locais do molde ao longo do tempo de ciclo, pretendia-se concluir se a introdução da tecnologia dos sensores FBG em moldes de injeção plástica se apresenta como uma mais-valia para a análise térmica do ciclo de moldação.

De acordo com os dados experimentais referentes à utilização dos sensores FBG é possível concluir que têm uma resposta rápida e são capazes de detetar variações de 0,1 °C com fiabilidade. Tendo em conta a margem de erro admissível nos valores obtidos só foram consideradas variações mínimas de temperatura à escala decimal. Esta imposição corresponde aproximadamente a 1,43 pm na resolução dos valores obtidos diretamente pelo sistema de interrogação das fibras óticas, cuja escala de resolução é 0,1 pm.

A partir dos valores recolhidos com os sensores FBG é possível identificar claramente as variações de temperatura nos ciclos de moldação em todos os locais.

Uma grande vantagem dos sensores FBG é a possibilidade de adquirir instantaneamente os valores de temperatura para um número praticamente infinito localizações. Poder-se-ia ter acoplado mais fibras óticas ao equipamento de interrogação e poder-se-ia ter gravado mais redes de Bragg por cada fibra ótica. Ou seja, o potencial máximo de utilização desta tecnologia vai muito além do que foi necessário para este trabalho.

A abordagem puramente térmica ao problema foi muito superficial, visto não ter sido apresentada nenhuma análise baseada na malha bidimensional gerada com os sensores. Dever-se-ia ter feito uma análise pormenorizada ao comportamento térmico dos sensores inseridos na placa moldante, para averiguar se as diferenças de temperaturas verificadas são uma constante na utilização deste tipo de sensores nestas condições impostas. O mais indicado seria realizar uma experiência com a placa moldante, fornecendo calor a uma das faces e recorrendo a uma dupla aquisição de dados através dos sensores FBG e de uma outra tecnologia de sensores de temperatura.

Os valores máximos obtidos nas experiências ficam aquém do valor de injeção do termoplástico, que foi de 230 °C. Portanto, se nos sensores não foram detetadas temperaturas acima dos 60 °C existiram vários fatores que contribuíram para tal. Pelos resultados da simulação numérica, conclui-se que a maior perda de calor ocorre entre o material polimérico e as placas moldantes, ou seja, entre estes dois componentes é onde se regista a maior diferença de

temperaturas. As perdas induzidas pela distância no molde até aos sensores, à partida, não deveriam ser muito significativas. Pelo que se conclui que uma parte considerável da divergência de temperaturas ocorrida deve-se a um diferencial próprio que os sensores de Bragg apresentam quando estão instalados no interior do molde de injeção.

Embora estejam devidamente justificadas algumas das vantagens da utilização dos sensores FBG, neste trabalho não se deu a devida importância aos outros tipos de sensores, mais comerciais, como é o caso do termopar.

## 7.2 Trabalho futuro

Para melhor se compreender esta aplicação tecnológica dos sensores FBG em moldes de injeção plástica, a prioridade número 1 será estudar e analisar exaustivamente o comportamento térmico do molde, identificando e quantificando todas as causas da diferença de temperaturas entre o material fundido e os sensores de Bragg. Associado a este trabalho, seria muito pertinente elaborar um modelo térmico bidimensional com base na malha gerada pelos sensores. Numa outra fase com os valores de temperatura durante um ciclo de moldação poder-se-ia passar o modelo 2D do regime estacionário para o regime transiente.

Outra proposta baseia-se no potencial que esta tecnologia traz ao aproveitar os dados recolhidos para implementar inovações no setor industrial. A partir dos valores obtidos com os sensores de Bragg é possível saber o tempo de cada ciclo. Constatou-se que quando o material polimérico presente no cilindro de injeção começou a escassear, o tempo de ciclo aumentou de 34 para 42 segundos aproximadamente. No entanto, os valores recolhidos pelas redes de Bragg não registaram os tempos de ciclo superiores, pois o volume de material injetado apenas preencheu a zona do jito, não alcançando a cavidade moldante das peças. Os valores registados nos sensores, quando o material começa a falhar, indicam uma evidente descida de temperatura após o término do último ciclo de moldação, num período superior a um tempo de ciclo. A proposta baseada nestes dados sugere a implementação de um sistema de comunicação para alertar o operador que o material polimérico está a escassear.



# Referências bibliográficas

---

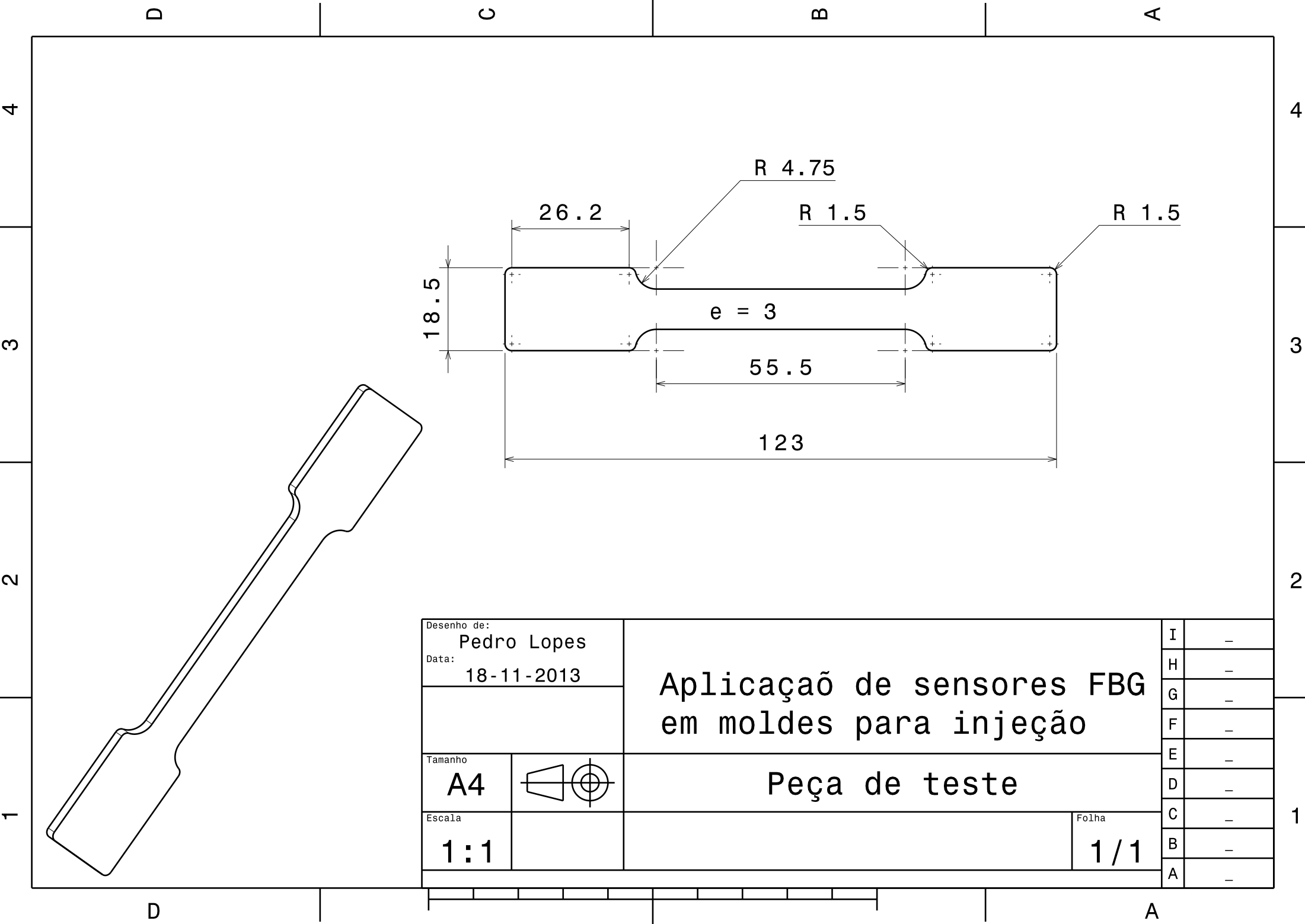
- [Alberto11] N. Alberto, “Sensores de Bragg para bioaplicações”, Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 2011.
- [Brockey13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Injection\\_molding](http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_molding)  
(consultado a 21 de outubro de 2013)
- [Custompart13] <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>  
(consultado a 21 de outubro de 2013)
- [Cunha03a] A. Cunha, A. Pontes e A. Brito "Manual do Projectista para Moldes de injeção de plástico, Moldação por injeção e materiais plásticos", Vol. 2, Centimfe, março de 2003.
- [Cunha03b] A. Cunha, A. Brito, A. Matos e A. Pontes, "Manual do Projectista para Moldes de injeção de plástico, Tipificação de moldes", Vol. 3, Centimfe, maio de 2003.
- [Doh08] C.H. Doh, D.H. Kim, H.-S. Kim, H.-M. Shin, Y.-D. Jeong, S.-I. Moon, B.-S. Jin, S.W. Eom, H.-S. Kim, K.-W. Kim, D.-H. Oh, A. Veluchamy, “Thermal and electrochemical behaviour of C/Li<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> cell during safety test”, 2008.
- [Hill78] K. Hill, Y. Fujii, D. Johnson and B. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, Appl. Phys. Lett., vol. 32, pp 647-649, 1978.
- [Incropera07] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Sixth Edition, 2007.
- [Kim11] U.S. Kim, J. Yi, C.B. Shin, T. Han, S. Park, “Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge”, 2011.
- [Kashyap10] R. Kashyap, “Fiber Bragg Gratings”, Academic Press, 2010.
- [Kawasaki78] B. Kawasaki, K. Hill, D. Johnson and Y. Fujii, “Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers”, Opt. Lett., vol. 3, pp. 66-68, 1978.

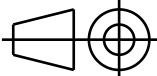
- [Liu13] M. Liu, E. Zhang, Z. Zhou, Y. Tan and Y. Liu, "Measurement of Temperature Field for the Spindle of Machine Tool Based on Optical Fiber Bragg Grating Sensors", Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Mechanical Engineering*, Volume 2013, Article ID 940626, 6 pages, 2013
- [Marques08] C. A. F. Marques, "Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra óptica", Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2008.
- [Martins09] A. F. M. Martins, "Estudo de Fibras Ópticas Sujeitas a Curvaturas Apertadas", Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2009.
- [Milmour13] [http://www.milmour.com/milmour/injection\\_molding\\_images.asp](http://www.milmour.com/milmour/injection_molding_images.asp) (consultado a 14 de Outubro de 2013)
- [Mra13] <http://www.mra.pt/industria/produtos/instrumentacao/medicao-com-fibra-optica/fibra-optica---redes-de-bragg/> (consultado a 21 de outubro de 2013)
- [Ni13] <http://www.ni.com/white-paper/11821/pt/> (consultado a 21 de Outubro de 2013)
- [Nogueira05] R. N. Nogueira, "Redes de Bragg em fibra óptica", Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2005.
- [Othonos97] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, pp. 4309-4341, 1997.
- [Othonos99] A. Othonos and Kalli, "Fiber Bragg gratings – Fundamentals and applications in telecommunications and sensing", Artech House, 1999.
- [Rosato95] D. V. Rosato, D. V. Rosato, "Injection Molding Handbook, the complete molding operation technology, performance, economics", Second edition, Chapman & Hall, 1995.
- [Silva03] J. Silva, C. Martelli, B. Diesel, J. Fabris, H. Kalinowski, N. Goothoff e J. Canning, "Termômetro de Alta Temperatura (0-400°C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor de Petróleo", In: III Seminário Nacional de Controle e Automação, pp. 187-192, 2003.
- [Yang13] G. Yang, C. Leitão, Y. Li, J. Pinto, X. Jiang, "Real-time temperature measurement with fiber Bragg sensors in lithium batteries for safety usage", 2013.

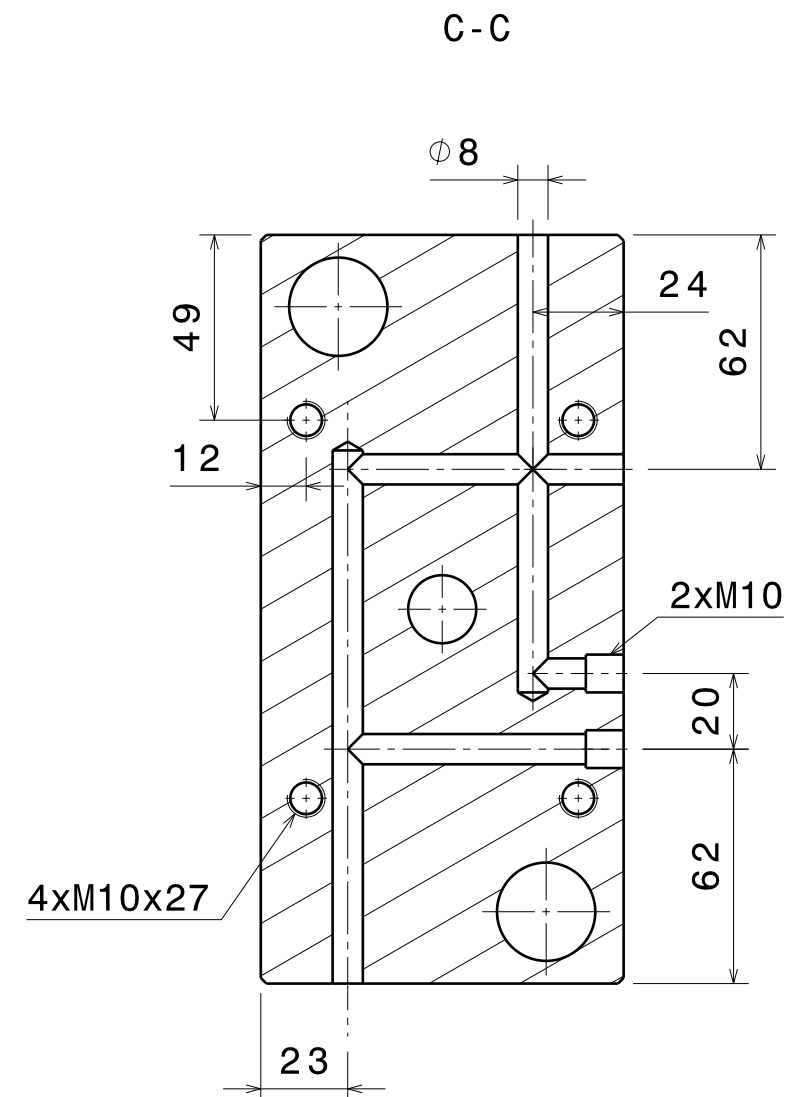
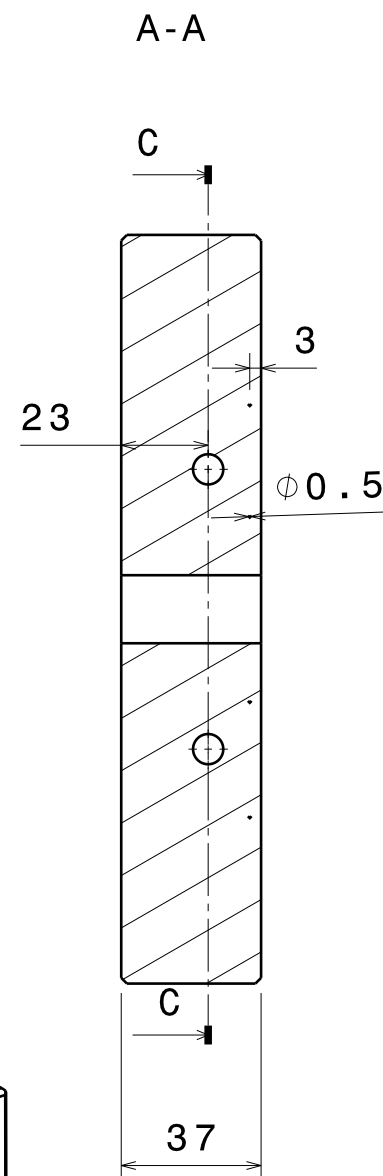
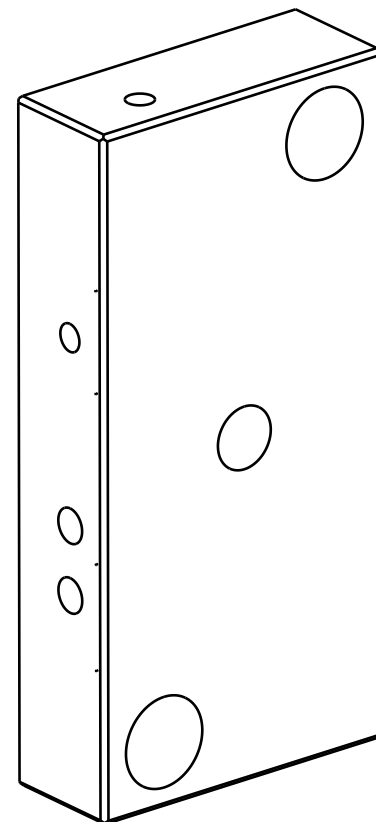
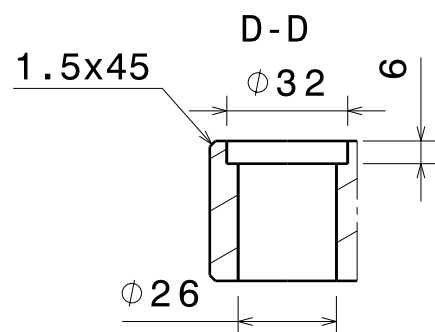
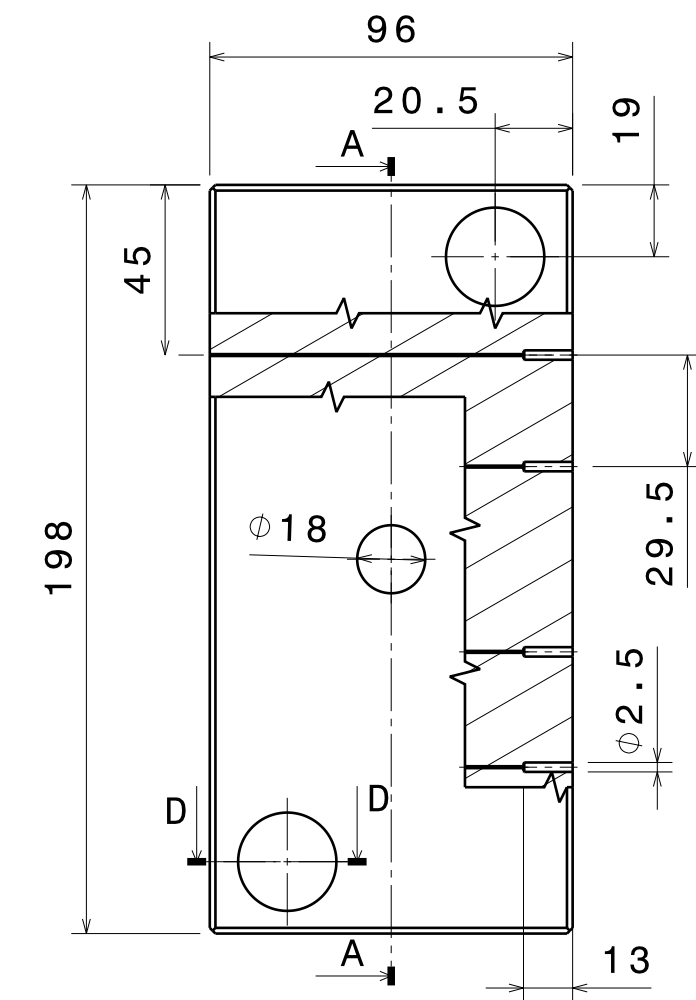
# **Anexos**

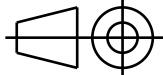
---

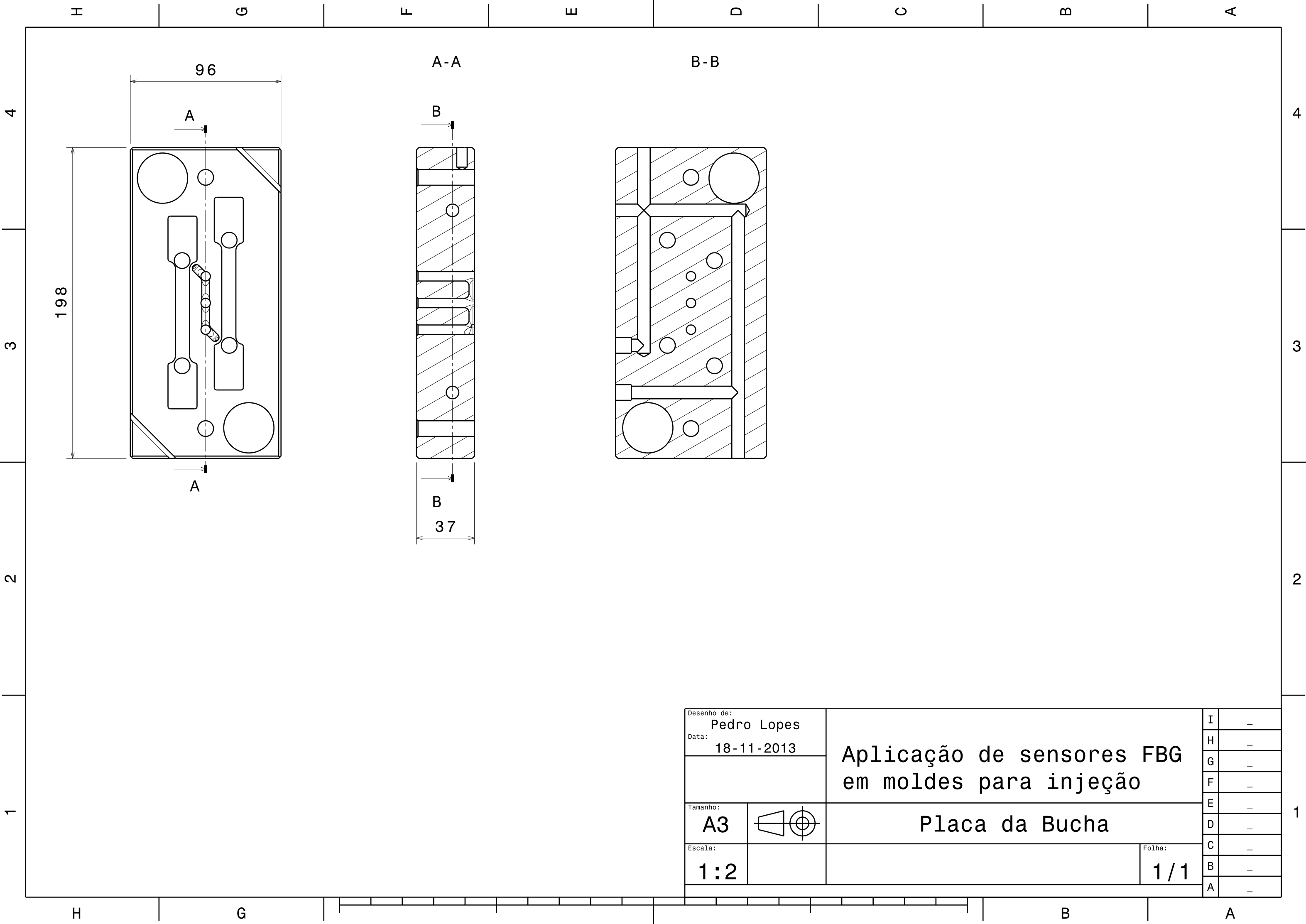
- A1. Desenho técnico do provete em PP**
- A2. Desenho técnico da placa moldante fixa (Cavidade)**
- A3. Desenho técnico da placa moldante móvel (Bucha)**

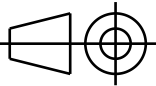


Desenho de: Pedro Lopes		Aplicação de sensores FBG em moldes para injeção	I	—
Data: 18-11-2013			H	—
			G	—
			F	—
			E	—
Tamanho A4		Peça de teste	D	—
Escala 1:1			C	—
			B	—
			A	—



Desenho de: <b>Pedro Lopes</b>		<b>Aplicação de sensores FBG em moldes para injeção</b>	I	—
Data: <b>18-11-2013</b>			H	—
			G	—
			F	—
			E	—
Tamanho: <b>A3</b>		<b>Placa da Cavidade</b>	D	—
Escala <b>1:2</b>			C	—
			B	—
			A	—



Desenho de: Pedro Lopes		Aplicação de sensores FBG em moldes para injeção	I	-
Data: 18-11-2013			H	-
			G	-
			F	-
			E	-
Tamanho: A3		Placa da Bucha	D	-
Escala: 1:2			C	-
			B	-
			A	-